ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Ремонт і обслуговування електроприводу та електронних приладів промислового обладнання:

курс лекцій з навчальної дисципліни

Запоріжжя 2026

УДК 658.58(076)
Р37

Рекомендовано Науково-методичною радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» (протокол № 7 від 04.06.2026 р.)

Укладач
Шрамко Ю.Ю. канд. техн. наук

Р37 **Ремонт і обслуговування електроприводу та електронних приладів промислового обладнання :** курс лекцій з навчальної дисципліни / уклад. Ю. Ю. Шрамко. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026. 245 с.

УДК 658.58 (076)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026

Зміст

ВСТУП 4
ТЕМА 1. ВСТУП. ПРЕДМЕТ І ЗАВДАННЯ КУРСУ. РОЛЬ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ І ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ У ПРОМИСЛОВОМУ ОБЛАДНАННІ 5
ТЕМА 2. ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ КЕРУВАННЯ І ЗАХИСНЕ ОБЛАДНАННЯ: КЛАСИФІКАЦІЯ, ПРИНЦИПИ РОБОТИ, ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА МЕТОДИ РЕМОНТУ 15
ТЕМА 3. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ: КОНСТРУКЦІЯ, ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ РЕЖИМИ, ТИПОВІ НЕСПРАВНОСТІ. МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ТА РЕМОНТУ 47
ТЕМА 4. СПОСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН. ОСОБЛИВОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗІ ЗМІННОЮ ШВИДКІСТЮ 73
ТЕМА 5. СИЛОВІ ТРАНСФОРМАТОРИ: БУДОВА, ПРИНЦИП РОБОТИ, ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ. ТИПОВІ ДЕФЕКТИ ТА МЕТОДИ РЕМОНТУ 99
ТЕМА 6. КАБЕЛЬНІ ЛІНІЇ 0,4–10 КВ: КОНСТРУКЦІЯ, МЕТОДИ ПРОКЛАДАННЯ, ДІАГНОСТИКА ПОШКОДЖЕНЬ, ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТ 122
ТЕМА 7. РОЗПОДІЛЬЧІ ПРИСТРОЇ 0,4–10 КВ: КОНСТРУКЦІЯ, ВИМОГИ ДО ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ОРГАНІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТ 160
ТЕМА 8. ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ: ЕКСПЛУАТАЦІЯ, ТИПОВІ НЕСПРАВНОСТІ, ДІАГНОСТИКА ТА ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ 184
ТЕМА 9. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПРИ РЕМОНТІ Й ТЕХНІЧНОМУ ОБСЛУГОВУВАННІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ (МУЛЬТИМЕТРИ, МЕГАОММЕТРИ, СТРУМОВІ КЛІЩІ, ТЕПЛОВІЗОРИ, ВІБРОАНАЛІЗАТОРИ) 220
ТЕМА 10. ДОКУМЕНТУВАННЯ РЕМОНТНИХ І СЕРВІСНИХ РОБІТ. 225
ТЕМА 11. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ ТА НОРМАТИВНІ ВИМОГИ ПРИ ОБСЛУГОВУВАННІ Й РЕМОНТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ТА ОБЛАДНАННЯ 230

ВСТУП

Сучасне промислове виробництво гірничого та металургійного комплексу базується на широкому застосуванні електроприводів, силової перетворювальної техніки та електронних систем керування. Надійність, енергоефективність і безпека технологічних процесів безпосередньо залежать від технічного стану електромеханічного обладнання, правильності його монтажу, своєчасного технічного обслуговування та якісного виконання ремонтних робіт. У цих умовах підготовка фахівців, здатних професійно здійснювати діагностику, ремонт і сервісне обслуговування електроприводів та електронних приладів промислового обладнання, є стратегічно важливою складовою інженерної освіти.

Курс спрямований на формування системного розуміння процесів експлуатації, технічного обслуговування, діагностики несправностей та відновлення працездатності електроприводних систем різного рівня складності – від класичних асинхронних приводів до сучасних частотно-регульованих та мікропроцесорних систем керування.

Метою дисципліни є формування у здобувачів освіти професійних компетентностей щодо:

- організації технічного обслуговування електроприводів;
- аналізу технічного стану електричних машин, силових кабельних ліній, комутаційної апаратури;
- діагностики електронних приладів і систем автоматизації;
- вибору методів та засобів вимірювання під час ремонту;
- документування ремонтних і сервісних робіт відповідно до нормативних вимог.

У межах курсу розглядаються питання конструкції та типових несправностей електричних машин, кабельних ліній і розподільчих пристроїв, методи визначення струмів короткого замикання, принципи роботи низьковольтної комутаційної та захисної апаратури, особливості експлуатації електронних регуляторів і перетворювачів, застосування сучасних засобів діагностики (мультиметри, мегаомметри, струмові кліщі, тепловізори, віброаналізатори). Значна увага приділяється питанням якості електричної енергії, енергозбереження, профілактичних і аварійних ремонтів, а також веденню технічної документації.

Опанування дисципліни створює підґрунтя для ефективної професійної діяльності в галузі експлуатації, монтажу, налагодження та ремонту електромеханічного обладнання промислових підприємств, підвищує конкурентоспроможність випускників на ринку праці та сприяє формуванню відповідального ставлення до питань безпеки праці, енергоефективності й надійності виробничих систем.

ТЕМА 1. ВСТУП. ПРЕДМЕТ І ЗАВДАННЯ КУРСУ. РОЛЬ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ І ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ У ПРОМИСЛОВОМУ ОБЛАДНАННІ

Огляд ролі дисципліни у професійній підготовці. Предмет і завдання курсу. Місце ремонту та технічного обслуговування в системі інжинірингу механічного обладнання.

Вступ.

Сучасне промислове виробництво неможливо уявити без електроприводів та електронних приладів. Вони забезпечують автоматизацію процесів, підвищення продуктивності, енергоефективність і надійність технологічних систем.

Однак будь-яке обладнання має обмежений ресурс і піддається впливу експлуатаційних факторів, тому актуальним стає завдання своєчасного обслуговування й ремонту.

Предметом дисципліни є електроприводи та електронні прилади промислового обладнання в аспекті:

- їх конструкції, принципів роботи та функціонування;
- методів контролю технічного стану;
- способів діагностики, технічного обслуговування та ремонту;
- практичних прийомів відновлення працездатності.

Завдання курсу

Основними завданнями є:

- формування знань про структуру та принципи роботи електроприводів і електронних систем;
- ознайомлення з нормативною базою та організацією технічного обслуговування;
- вивчення методів пошуку і усунення несправностей;
- набуття навичок виконання профілактичних і ремонтних операцій;
- підготовка до роботи з реальним обладнанням у виробничих умовах.

Роль технічного обслуговування та ремонту

- Підтримання працездатності обладнання: своєчасне ТО зменшує кількість аварійних зупинок.
- Подовження ресурсу: профілактичні заходи знижують темпи зношування вузлів і компонентів.
- Економічний ефект: зменшення витрат на аварійні ремонти й простої виробництва.
- Безпека: надійне обладнання мінімізує ризики для персоналу та виробництва.

- Енергозбереження: справні приводи та електроніка працюють із більшою ефективністю, знижуючи споживання енергії.

Основні визначення.

Експлуатація електроприводів та електронних приладів промислового обладнання — це стадія їх життєвого циклу, яка починається з моменту прийняття від заводу-виробника або ремонтного підприємства і триває до зняття з експлуатації. На цьому етапі реалізується, підтримується та відновлюється працездатність і задані технічні характеристики обладнання.

У ширшому значенні експлуатація означає використання електроприводів та електронних систем з метою забезпечення виробничих потреб і досягнення необхідної ефективності технологічних процесів.

До складу експлуатаційних заходів входять:

- введення в експлуатацію обладнання;
- приведення його у робочий стан (готовність до застосування);
- підтримання працездатності у процесі використання;
- безпосереднє виконання функцій електроприводом та приладами;
- зберігання у періоди простою;
- транспортування на об’єктах виробництва;
- визначення технічного стану та категорування;
- виведення з експлуатації (списання).

Усі заходи, що здійснюються під час експлуатації електроприводів та електронних приладів промислового обладнання, умовно поділяють на три основні групи:

- Робота обладнання
  - Виконання електроприводами своїх основних функцій: перетворення електричної енергії у механічну, забезпечення руху механізмів.
  - Функціонування електронних приладів у системах керування, захисту, регулювання та діагностики.
  - Збереження стабільних параметрів у межах заданих технічних характеристик.
  - Контроль режимів роботи з боку обслуговуючого персоналу.
- Профілактичне технічне обслуговування
  - Регулярне виконання планових перевірок та регулювань.
  - Очищення, змащення, підтяжка з’єднань, контроль ізоляції, перевірка датчиків і приладів керування.
  - Діагностування технічного стану з використанням вимірювальних приладів і спеціалізованого програмного забезпечення.

- Попередження аварій та продовження ресурсу електроприводів і приладів за рахунок своєчасного виявлення зношування або дефектів.

- Організація експлуатації
  - Планування графіків роботи, обслуговування та ремонтів.
  - Забезпечення персоналу інструкціями, нормативними документами, засобами контролю та інструментами.
  - Ведення обліку стану обладнання та результатів профілактичних робіт.
  - Організація навчання і підготовки персоналу для роботи з електроприводними системами та електронними приладами.
  - Оптимізація витрат на утримання обладнання з урахуванням економічної ефективності.

У рамках курсу під роботою системи електропостачання, електроприводу та електронних приладів промислового обладнання розуміють їх використання за призначенням у широкому сенсі. При цьому пристрої можуть перебувати:

- у робочому стані — коли:
  - електропривід виконує рухові операції,
  - електронні прилади забезпечують керування, регулювання, захист або перетворення енергії;
  - коли елементи системи електропостачання перебувають під напругою та виконують процеси генерування, розподілу, перетворення або передачі електричної енергії
- у знеструмленому стані (режим очікування) — коли обладнання не задіяне у процесі, але готове до подальшої експлуатації після вмикання.

Таке трактування дозволяє розглядати **технічне обслуговування та ремонт електроприводів і електронних приладів** як єдиний комплекс заходів, спрямований на забезпечення їх надійності та працездатності як під час активної експлуатації, так і у періоди простою. Для збереження справного стану обладнання та продовження його ресурсу необхідно систематично проводити профілактичні роботи.

Під профілактичним обслуговуванням електроприводів та електронних приладів розуміють сукупність заходів, що включають контроль технічного стану, підтримку працездатності та запобігання передчасному зносу.

Усі профілактичні заходи можна поділити на три основні групи:

- **а) контроль технічного стану** — діагностика параметрів електроприводів і приладів, перевірка ізоляції, аналіз зносу вузлів та елементів;
- **б) технічне обслуговування** — виконання регламентних робіт: очищення, змащування, регулювання, підтяжка контактних з’єднань, перевірка та калібрування електронних приладів;

- **в) ремонт** — усунення виявлених несправностей, заміна зношених або пошкоджених деталей, відновлення працездатності обладнання до рівня, що відповідає нормативним вимогам.

Контроль технічного стану електроприводів та електронних приладів здійснюється з метою оцінки їхньої працездатності. Будь-який електротехнічний пристрій призначений для виконання певних функцій, а його стан визначається здатністю забезпечувати ці функції у межах заданих параметрів.

- Якщо фактичні значення параметрів обладнання відповідають номінальним значенням або допускам, воно вважається **справним** і здатне надійно виконувати виробничі завдання.
- Якщо хоча б один із основних параметрів виходить за встановлені межі, обладнання визнається **несправним**, оскільки не може гарантувати повного виконання необхідних функцій.

Класифікація методів контролю технічного стану електроприводів та електронних приладів

- Візуальний контроль
  - Огляд обладнання без застосування спеціальних приладів.
  - Виявлення механічних пошкоджень, слідів перегріву, іржі, порушення ізоляції, наявності сторонніх шумів чи запахів.
  - Використовується як первинний етап контролю.
- Вимірювальний контроль
  - Виконання перевірок за допомогою контрольно-вимірювальних приладів (мультиметри, мегомметри, осцилографи, аналізатори якості електроенергії).
  - Зіставлення отриманих даних з паспортними або нормативними значеннями.
  - Дає кількісну оцінку технічного стану.
- Діагностичний контроль
  - Застосування спеціалізованих методів і програмного забезпечення для визначення прихованих дефектів.
  - Приклади: аналіз спектра струму та напруги, віброаналіз, тепловізійний контроль, акустичний аналіз.
  - Дозволяє виявляти відхилення на ранніх стадіях зношування.
- Програмно-інформаційний контроль
  - Використання вбудованих систем моніторингу та контролерів (PLC, систем SCADA, інтерфейсів частотних перетворювачів).
  - Автоматичний збір та обробка даних про роботу електроприводів і приладів.
  - Можливість прогнозування несправностей за допомогою алгоритмів діагностики та штучного інтелекту.

Таким чином, контроль технічного стану полягає у **зіставленні поточних значень параметрів електроприводу чи приладу з**

нормативними значеннями, що дозволяє зробити висновок про його справність або несправність.

Електроприводи та електронні прилади, які тимчасово не використовуються у виробництві, підлягають **зберіганню**. Для забезпечення їхньої надійності у подальшій експлуатації під час зберігання необхідно проводити **регламентне технічне обслуговування**, спрямоване на підтримання справності та запобігання деградації параметрів.

Технічне обслуговування електроприводів та електронних приладів промислового обладнання — це комплекс робіт, спрямованих на підтримання їх у справному та придатному для експлуатації стані протягом усього періоду використання за призначенням.

До складу технічного обслуговування входять такі основні роботи:

- **а) зовнішній огляд і очищення обладнання** — видалення пилу, бруду, залишків мастила та інших забруднень, що можуть погіршувати роботу;
- **б) контрольно-регулювальні операції** — перевірка параметрів, підтягування контактних з'єднань, налаштування систем керування і захисту;
- **в) прогнозування можливих відмов** — оцінка технічного стану з урахуванням діагностичних даних, визначення ймовірних місць виникнення дефектів;
- **г) сезонні, змащувальні та кріпильні роботи** — заміна або доливання мастильних матеріалів, нанесення захисних покриттів, перевірка надійності кріплень;
- **д) випробування обладнання і приладів** — проведення електричних і механічних випробувань, вимірювання ізоляційних характеристик, перевірка систем захисту та автоматики.

Тобто технічне обслуговування охоплює як **профілактичні заходи**, так і **контрольні операції**, які дозволяють забезпечити безвідмовну роботу обладнання та попередити аварійні відмови.

Ремонт електроприводів та електронних приладів промислового обладнання — це комплекс операцій, спрямованих на відновлення їхнього справного або працездатного стану, а також на продовження ресурсу роботи. Ремонт виконується за системою планово-попереджувальних чи позапланових заходів і має на меті усунення виявлених несправностей, дефектів чи наслідків зносу.

Залежно від ступеня спрацювання та старіння обладнання, характеру несправностей і складності робіт розрізняють два основних види ремонту:

- **Поточний ремонт** — виконується обслуговуючим персоналом одразу після виявлення несправності, як у процесі роботи, так і під час технічного обслуговування. Його мета — швидке відновлення працездатності обладнання без проведення складних операцій.

- **Капітальний ремонт** — здійснюється за планом спеціалізованими ремонтними підприємствами або експлуатаційно-ремонтними майстернями. Він передбачає значний обсяг робіт: заміну вузлів і агрегатів, відновлення ізоляції, модернізацію електронних систем керування, перевірку та налаштування всіх функціональних характеристик.

Ефективність ремонтних заходів безпосередньо залежить від правильної організації експлуатації обладнання: своєчасного контролю, регулярного технічного обслуговування та дотримання правил використання електроприводів і приладів у виробничих умовах.

Організація експлуатації електроприводів та електронних приладів включає комплекс заходів, спрямованих на забезпечення їхньої надійної та ефективної роботи. До таких заходів належать: підготовка кваліфікованих кадрів, постачання обладнання запасними частинами (ЗІП) і витратними матеріалами, планування режимів роботи та технічного обслуговування, а також збір і аналіз результатів експлуатації.

Якість експлуатації значною мірою залежить від професійної підготовки персоналу. Людина відіграє ключову роль на всіх етапах життєвого циклу обладнання, оскільки може бути:

- елементом системи, що забезпечує функціонування електроприводів і приладів із заданою продуктивністю;
- джерелом потенційних відмов у разі помилок чи недбалості;
- учасником процесів, що підтримують надійність і працездатність обладнання;
- виконавцем ремонтних заходів та відновлення працездатності.

Для ефективної експлуатації необхідна організація:

- належного постачання витратними матеріалами та запасними елементами з їхнім своєчасним поповненням;
- планування графіків роботи обладнання, технічного обслуговування та ремонтів;
- підготовки й підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Збір та обробка результатів експлуатації, аналіз статистичних даних дозволяють розробляти заходи з підвищення надійності та вдосконалення систем. Важливим є своєчасне інформування заводів-виробників щодо виявлених недоліків та пропозицій з удосконалення конструкцій.

Таким чином, організація експлуатації є багатокомпонентним процесом, від якості реалізації якого залежить довговічність, надійність та ефективність роботи електроприводів і електронних приладів.

Суть і зміст підсистем експлуатації

Систему експлуатації ЕТЗ можна розділити на три функціонально самостійні підсистеми (рис. 1.1):

- Підсистема штатної експлуатації.

- Підсистема технічної експлуатації.
- Підсистема організації та забезпечення штатної та технічної експлуатації.

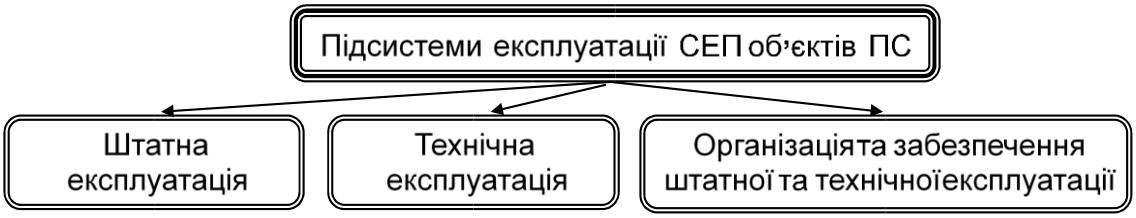


Рисунок 1.1 – Підсистеми експлуатації ЕТЗ

Штатна експлуатація складається з:
- безпосереднього (штатного) застосування;
- процесу чергування в чеканні наказу на штатне застосування.

Технічна експлуатація містить у собі процеси (рис. 1.2):
- зберігання і транспортування ЕТЗ ;
- технічного обслуговування ЕТЗ ;
- ремонту (відновлення) ЕТЗ ;
- супроводження експлуатації ЕТЗ ():
- введення в експлуатацію зразків ЕТЗ;
- приведення в готовність зразків ЕТЗ;
- підтримка в готовності зразків ЕТЗ;
- категорування ЕТЗ;
- списання зразків ЕТЗ.

Рисунок 1.2 – Зміст технічної експлуатації ЕТЗ

Організація і забезпечення штатної і технічної експлуатації містить у собі (рис. 1.3):

- організацію штатної та технічної експлуатації:
  - планування штатної і технічної експлуатації;
  - організація виконання планів;
  - контроль виконання планів, їх оперативне коригування;
  - оперативне управління ;
  - ведення обліку і звітності по всіх питаннях штатної та технічної експлуатації;
- забезпечення штатної і технічної експлуатації:
  - матеріально-технічне забезпечення:
- електротехнічні засоби;
- ЗІП і витратні матеріали;
  - метрологічне забезпечення;
  - забезпечення підготовки й допуску особового складу до експлуатації ЕТЗ;
  - забезпечення безпеки робіт:
- організаційні заходи;
- технічні заходи.

Рисунок 1.3 – Організація і забезпечення експлуатації

Висновки

1. Електроприводи та електронні прилади є ключовими елементами сучасного промислового обладнання, оскільки забезпечують автоматизацію, продуктивність, енергоефективність та надійність виробничих процесів.

2. Експлуатація обладнання охоплює увесь період від прийняття від виробника до списання і включає введення в роботу, підтримання працездатності, контроль стану, обслуговування, ремонт і зберігання.

3. Усі заходи в межах експлуатації поділяються на три групи: робота обладнання, профілактичне технічне обслуговування та організація експлуатації.

4. Контроль технічного стану базується на зіставленні фактичних параметрів з нормативними і дозволяє вчасно виявити несправності. Використовуються методи: візуальний, вимірювальний, діагностичний, програмно-інформаційний.

5. Технічне обслуговування включає регламентні роботи: огляд, очищення, змащування, підтягування контактів, випробування та прогнозування можливих відмов.

6. Ремонт поділяється на поточний (швидке усунення несправностей силами персоналу) і капітальний (комплексне відновлення ресурсів спеціалізованими підприємствами).

7. Організація експлуатації охоплює підготовку кадрів, забезпечення ЗІП і матеріалами, планування робіт та аналіз результатів, що безпосередньо впливає на ефективність і довговічність обладнання.

8. Людина виступає вирішальним чинником: від її кваліфікації залежить безпека, надійність і ресурс обладнання.

9. Своєчасне інформування виробників щодо результатів експлуатації дає змогу вдосконалювати конструкцію і підвищувати надійність техніки

Контрольні питання.

1. Що входить до складу організації експлуатації електроприводів та електронних приладів?

2. Яку роль відіграє кваліфікація персоналу у процесі експлуатації обладнання?

3. У яких аспектах людина виступає ключовим елементом системи експлуатації?

4. Чому своєчасне постачання запасних елементів та витратних матеріалів є важливою складовою експлуатації?

5. Які основні завдання вирішує планування експлуатації обладнання?

6. Для чого здійснюється збір та обробка результатів експлуатації?

7. Як результати аналізу експлуатації впливають на підвищення надійності обладнання?

8. Чому важливо передавати результати експлуатації та рекомендації заводам-виробникам?

9. Від яких факторів залежить якість експлуатаційних властивостей обладнання?

10. Які заходи дозволяють підтримувати електроприводи та електронні прилади у справному стані протягом усього життєвого циклу?

Використана література.

1. Монтаж та налагоджування електромеханічних пристроїв : навч. посіб. / В. В. Грабко та ін. Вінниця : ВНТУ, 2020. 173 с.

2. Експлуатація та монтаж електрообладнання: методичні вказівки для самостійної роботи з навчальної дисципліни «Експлуатація та монтаж електрообладнання» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: Р. В. Телюта, О.А.Козловський, В. В. Зінзура. Кропивницький : ЦНТУ, 2018. 200 с.

3. Монтаж і експлуатація електрообладнання : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форми навчання / уклад.: Ю.В. Грицюк. Луцьк : Луцький НТУ, 2020. 48 с.

ТЕМА 2. ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ КЕРУВАННЯ І ЗАХИСНЕ ОБЛАДНАННЯ: КЛАСИФІКАЦІЯ, ПРИНЦИПИ РОБОТИ, ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА МЕТОДИ РЕМОНТУ

Класифікація та принципи роботи апаратів керування, комутаційних та захисних пристроїв. Типові несправності та методи їх усунення. Вимоги до експлуатації.

Електричні апарати є складовою частиною систем електропостачання та електроприводу і призначені для керування, комутації, захисту, контролю та регулювання електричних кіл. Вони забезпечують безпечну та надійну роботу електрообладнання в нормальних і аварійних режимах.

У сучасних промислових установках електричні апарати застосовуються як у силових колах, так і в колах керування, автоматики та захисту, утворюючи єдину функціональну систему.

Поняття електричного апарату. Класифікація і вимоги до електричних апаратів

Електричний апарат – електротехнічний пристрій, що застосовується для:

- комутації електричних кіл;
- контролю та вимірювання параметрів;
- захисту від аварійних режимів;
- керування та регулювання обладнання, яке забезпечує виробництво, передачу, розподіл і споживання електроенергії.

Основні групи електричних апаратів

- Апарат високої напруги (6–1150 кВ)
  - Виконують оперативні перемикання в електричних мережах і системах.
  - Забезпечують захист від коротких замикань, перенапруг та перевантажень.
- Апарат керування низької напруги (127–1140 В)
  - Керують режимом роботи електрообладнання (тягові мережі, рухомий склад, розподільні мережі).
  - Реалізують автоматичний захист від аварійних режимів.
- Апарат автоматики
  - Контролюють електричні й неелектричні параметри обладнання.
  - Формують сигнали для схем автоматики та керування.
  - Приклад: реле автоматики та захисту (АВР, АПВ).
- Автоматичні регулятори і стабілізатори
  - Підтримують задані параметри електроустановок за певним законом.

- Підсилювачі та перетворювачі
- Посилюють слабкі сигнали.
- Перетворюють одну форму сигналу в іншу (постійний ↔ змінний струм).

– Напівпровідникові апарати (НПА) — низьковольтні (до 1000 В)
- Виконують комутацію, керування та захист електричних кіл.
- Застосовуються для контролю та регулювання електричних і неелектричних процесів.

Класифікація електричних апаратів:
– за призначенням (основною виконуваною функцією);
– за областю застосування;
– за принципом дії;
– за родом струму;
– за виконанням захисту від впливів навколишнього середовища;
– – за конструктивними особливостям.

Класифікація електричних апаратів за призначенням
– **Комутаційні апарати**
- Виконують комутацію електричних кіл.
- Приклади: рубильники, пакетні вимикачі, вимикачі навантаження, вимикачі високої напруги, роз'єднувачі, короткозамикачі, автоматичні вимикачі, запобіжники.
- Характерна особливість – відносно рідке вмикання і вимикання.

– **Обмежуючі апарати**
- Призначені для обмеження струмів короткого замикання (реактори) та перенапруг (розрядники).
- Працюють в аварійних режимах.

– **Пускорегулюючі апарати**
- Виконують пуск і регулювання частоти обертання, напруги, струму електричних машин та інших споживачів енергії.
- Приклади: контролери, командоконтролери, контактори, пускачі, резистори, реостати.
- Характерна особливість – дуже часті комутації (до 3600 і більше разів за годину).

– **Контролюючі апарати**
- Вимірюють і контролюють електричні або неелектричні параметри.
- Приклади: реле, датчики.
- Особливість: плавна зміна контрольованої величини викликає стрибкоподібну зміну вихідного сигналу (реле) або перетворюється у плавну зміну (датчики).

– **Вимірювальні апарати**

- Ізолюють вимірювальне коло від головного та перетворюють величину у стандартне значення.
- Приклади: трансформатори струму, трансформатори напруги, ємнісні дільники.

– **Електричні регулятори**

- Автоматично регулюють заданий параметр за визначеним законом.

Розподіл апаратів за областю застосування умовне тому, що одні і ті ж апарати можуть бути віднесені до різних груп.

Класифікація апаратів у межах групи:

– а) за напругою - низького (до 1000 В включно) і високого (від 1000 В
– и вище);
– б) за родом струму - постійного, змінного промислової частоти і
– змінного підвищеної частоти;
– в) за родом захисту від навколишнього середовища - відкриті,
– захищені, бризгозахищені, водозахищені, герметичні, вибухо-небезпечні й ін.;
– г) за засобом (принципу) дії - електромагнітні, магнітоелектричні,
– індукційні, теплового й інші;
– д) за інших факторами (швидкодія, засоби гасіння дуги й ін.).

Загальні вимоги до електричних апаратів

– **Теплові та динамічні умови**

- У номінальному режимі температура струмоведучих частин не повинна перевищувати норм ДСТУ.
- При короткому замиканні апарат має зберігати працездатність після усунення аварії.

– **Зносостійкість**

- Апарат, що часто комутує коло, повинен мати високу механічну та електричну довговічність.

– **Контакти**

- Розраховуються на відключення струмів короткого замикання.

– **Ізоляція**

- Має витримувати перенапруги та забезпечувати нормативний строк служби.

– **Специфічні властивості**

- Апарат повинен відповідати особливостям свого призначення.

– **Надійність**

- Забезпечення стабільної роботи в усіх умовах експлуатації.

– **Раціональність конструкції**

- Маса, габарити, вартість та трудомісткість монтажу мають бути мінімальними.

Явище теплової дії електричного струму

– При протіканні електричного струму у провіднику електрони зіштовхуються з атомами речовини, передаючи їм частину своєї енергії.

– Це призводить до підвищення температури провідника, тобто до його нагрівання.

– Фактично електричний струм виконує роботу, яка витрачається на збільшення кінетичної енергії атомів та молекул.

Практичне застосування:

– теплові розчіплювачі автоматичних вимикачів;

– теплові реле;

– плавкі запобіжники.

Явище електромагнетизму

– При русі заряджених частинок виникає магнітне поле.

– Таким чином, під час проходження струму по провіднику навколо нього утворюється магнітне поле.

Застосування в електричних апаратах:

– обмотки електричних машин та котушки апаратів керування;

– створення магнітного поля й магнітного потоку в апаратах;

– робота тягових електромагнітів.

Явище електромагнітної індукції

– У провідному контурі виникає (індукується) електрорушійна сила (ЕРС), якщо:

- контур переміщується в магнітному полі;
- контур пронизується змінним магнітним потоком.

Застосування в електричних апаратах:

– основа принципу дії генераторів постійного і змінного струму;

– використовується у датчиках індукційного типу;

– спостерігається в обмотках електричних апаратів і машин, що рухаються в магнітному полі.

Явище електромагнітної сили

– Якщо провідник зі струмом розташувати в магнітному полі, на нього діє **електромагнітна сила (сила Ампера)**.

Застосування в електричних апаратах:

– принцип роботи електродвигунів;

– реле струму та реле напруги;

– електромагнітні розчіплювачі автоматичних вимикачів.

Конструктивні елементи електричних апаратів

Електромагніт для тягових зусиль

– Складається з **обмотки** та **магнітопроводу**, що створюють тягове зусилля певної сили.

Котушка – головний елемент електромагніта, повинна:

– забезпечувати надійне спрацьовування навіть у нагрітому стані та при зниженій напрузі;

– не перегріватися понад допустиму температуру при всіх режимах (у т.ч. при підвищеній напрузі);

– мати мінімальні розміри та бути зручною у виробництві;

– відзначатися механічною міцністю;

– мати надійну ізоляцію (у деяких випадках – волого-, кислото- та маслостійку).

Напруги, що виникають у котушці під час роботи:

– механічні – від електродинамічних сил у витках (особливо при змінному струмі);

– термічні – внаслідок нерівномірного нагрівання;

– електричні – від перенапруг (зокрема під час відключення).

Умови правильного розрахунку котушки:

– Забезпечення необхідної магніторушійної сили (МРС) при гарячій котушці та зниженій напрузі.

– Температура нагрівання не повинна перевищувати допустиме значення.

У результаті розрахунку мають бути визначені такі величини, що необхідні для намотування: d – діаметр дроту обраної марки; w – число витків; R – опір котушки.

Класифікація котушок за конструктивним виконанням

1. Каркасні
   - Намотування проводиться на металевому або пластмасовому каркасі.
4. Безкаркасні бандажовані
   - Намотування здійснюється на знімному шаблоні. Після намотування котушка підлягає бандажуванню.
5. Безкаркасні з намотуванням на осердя
   - Провід намотують безпосередньо на осердя магнітної системи.

Однією з головних складових електричних апаратів керування і захисту є електромагніт.

Електромагніт як складова електричних апаратів

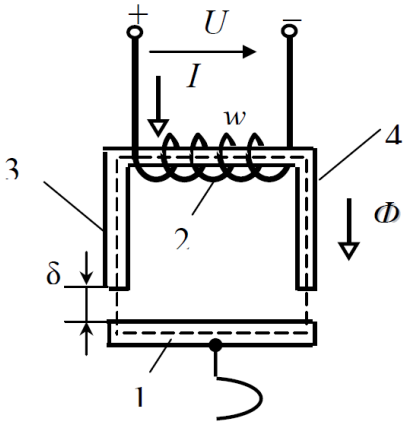
– В електричних апаратах керування і захисту електромагніт виконує функцію створення стискального або тягового зусилля.

Магнітопровід електромагніта складається з двох частин:

– **осердя** – нерухома частина, осерді розташована обмотка, яка під час проходження струму створює магнітний потік;

– **якір** – рухома частина;

Приклад: будова електромагніта для тягових зусиль у клапанній електромагнітній системі (рис. 2.1).



1- якорна частина магнітопроводу; 2– котушка; 3,4 – осердя (стриж ні) магнітопроводу; δ – повітряний зазор.

Рисунок 2.1 – Будова електромагніту для тягових зусиль

Принцип дії електромагніта для тягових зусиль

При проходженні електричного струму через обмотку в ній виникає магнітне поле, силові лінії якого замикаються по магнітопроводу. Домени в осерді впорядковуються, що формує основний магнітний потік Ф. Цей потік проходить через повітряний зазор і створює силу тяги між якорем та осердям. Коли струм у котушці досягає певного значення, тягове зусилля урівноважує опір механічної частини апарата, і якір притягується до осердя — відбувається спрацьовування електромагніта. Подальше збільшення струму призводить до зростання тягової сили та зменшення часу спрацьовування, аж до моменту насичення магнітопроводу. Якщо струм зменшиться нижче критичного значення, сила тяги стане меншою за механічний опір, і якір відпустить осердя — електромагніт повернеться у вихідний стан.

Фізичні явища при роботі електромагніту для тягових зусиль

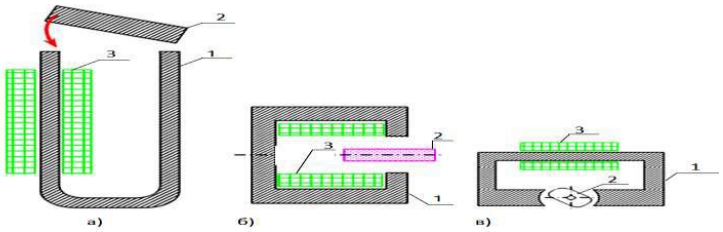
Під час роботи електромагніту в його конструктивних елементах спостерігається цілий комплекс фізичних процесів. В обмотці проявляються явища протікання електричного струму, електромагнетизму, теплова дія струму, а при змінному струмі – ще й електромагнітна індукція (самоіндукція). У магнітопроводі виникають явища гістерезису зі супровідними тепловими втратами, електромагнітна індукція та вихрові струми, що також спричиняють додаткове нагрівання. Крім того, у ньому діють електромагнітні сили, які забезпечують переміщення якоря, тобто виникає явище механічного руху.

Електромагніти для тягових зусиль класифікуються:

1. За родом струму:
   - постійного струму;
   - нейтральні, які не реагують на полярність вхідного сигналу;

- поляризовані, у яких напрям переміщення якоря визначається полярністю керуючого сигналу.
- змінного струму;

6. За способом дії:
   - притягуючі;
   - утримуючі.
7. За характером руху якоря:
   - з поступальним рухом;
   - з обертальним рухом.
8. За конструктивним виконанням:
   - клапанного типу (рис. 2.2 а);
   - з втягуючим якорем (рис. 2.2 б);
   - з поворотним якорем (рис. 2.2 в).



а) - клапанного типу, б) - з втягуючим якорем, в) - з поворотним якорем, 1- осердя, 2- якорь, 3- обмотка.

Рисунок 2.2 - Конструктивне виконання електромагнітів для тягових зусиль

Види передачі тепла в електричних апаратах. Режими експлуатації

Передача теплоти завжди відбувається від більш нагрітого тіла до менш нагрітого і триває доти, доки температури не зрівняються. Інтенсивність процесу залежить від температурного перепаду: чим вища температура нагрітого тіла, тим швидше відбувається теплообмін.

Виділяють три основні види передачі теплоти:

– теплопровідність – перенесення теплоти в межах одного тіла або між дотичними тілами; характеризується коефіцієнтом теплопровідності λ (Вт/м·К), що показує кількість теплоти, яка проходить через площу 1 м² за 1 секунду при градієнті температури 1 К/м;

– конвекція – теплообмін між тілом і рідиною чи газом, які його омивають; нагріті шари середовища піднімаються вгору, переносячи теплоту;

– теплове випромінювання – передача енергії у вигляді електромагнітних хвиль від нагрітого тіла.

Конвекція може бути природною або штучною

Електричні апарати є складними електротехнічними пристроями, що складаються з елементів, які проводять електричні струми, провідників магнітного потоку та ізоляційних частин. Деякі елементи можуть пе-

реміщуватися, передаючи механічні зусилля іншим вузлам. Робота багатьох апаратів супроводжується перетворенням одного виду енергії в інший, що завжди пов'язано з енергетичними втратами у вигляді тепла.

Основними є втрати теплоти у струмоведучих частинах апаратів. Нагрівання струмоведучих елементів та ізоляції визначає рівень надійності роботи, тому температура під час експлуатації не повинна перевищувати значень, за яких забезпечується тривалий строк служби апарата.

В апаратах постійного струму нагрівання відбувається за рахунок втрат в активному опорі провідників. У колах змінного струму активний опір відрізняється від опору при постійному струмі через дію поверхневого ефекту та ефекту близькості.

Поверхневий ефект полягає у витісненні струму до поверхні провідника, що фактично зменшує його активний переріз. Це призводить до збільшення опору провідника у порівнянні з опором при постійному струмі та, відповідно, до додаткових теплових втрат.

Ефект близькості. При близькому розташуванні провідників магнітне поле сусіднього провідника перетинає даний провідник і наводить у ньому МРС. Ця ЕРС створює струм у тілі провідника, що складається геометрично з основним струмом. У результаті струм розподіляється по перегину провідника нерівномірно, спричиняючи зміну розрахункового його активного опору.

Втрати у неструмоведучих феромагнітних частинах

У змінному полі, крім втрат у струмоведучих елементах, виникають додаткові втрати в феромагнітних деталях апаратів. Вони зумовлені двома процесами: гістерезисом (перемагнічуванням магнітопроводу) та вихровими струмами.

Втрати на гістерезис залежать від магнітних властивостей матеріалу: його магнітної проникності, форми петлі гістерезису та частоти змінного струму. Чим вужча петля гістерезису, тим менші енергетичні витрати на перемагнічування. Зі зростанням частоти змінного струму втрати енергії на гістерезис зростають пропорційно.

Таким чином, для зменшення втрат у феромагнітних частинах важливе значення має правильний вибір матеріалу з високою магнітною проникністю та вузькою петлею гістерезису.

Вихрові струми та нагрівання котушок електричних апаратів

Змінний струм у котушці створює змінний магнітний потік у магнітопроводі. Внаслідок електромагнітної індукції виникають ЕРС самоіндукції та вихрові струми, напрям яких такий, що створені ними потоки протидіють зміні основного магнітного потоку. Це призводить до розмагнічувальної дії та нерівномірного розподілу магнітного потоку по перетину. Шар, у межах якого індукція зберігає сталу величину, називають глибиною проникнення потоку. Такий ефект аналогічний поверхневому ефекту у провідниках.

Нагрівання котушок. Конструкція котушки містить провідник, ізоляцію та прошарки повітря або просочуючих матеріалів (лак, компаунд). Теплота, яка виділяється по всьому об'єму котушки, проходить до поверхні через матеріали з різною теплопровідністю. Усередині котушки температура вища, ніж на поверхні. Чим щільніше намотана котушка, тим краща теплопровідність між шарами і тим менша різниця температур між внутрішніми та зовнішніми шарами. Просочення та компаундування підвищують загальну теплопровідність котушки, що покращує тепловіддачу на 5–10 °С.

Тепловіддача котушок електричних апаратів

Різні ділянки поверхні котушки беруть участь у тепловіддачі неоднаково. Основна частина тепла відводиться через зовнішню бічну поверхню, яка зазвичай відкрита і охолоджується переважно завдяки природній конвекції. Усередині котушки розташоване осердя. Через невеликі зазори між осердям і котушкою конвекція ускладнена, але при щільному приляганні тепло передається головним чином шляхом теплопровідності. Ефективність тепловіддачі залежить від щільності контакту котушки з осердям та площі тепловіддаючої поверхні магнітопроводу.

Торцеві поверхні котушки зазвичай закриті ізоляційними деталями з низькою теплопровідністю, тому їхній внесок у відведення тепла незначний. У довгих котушках цим тепловим потоком можна знехтувати, тоді як у коротких його слід враховувати.

Режими експлуатації електричних апаратів

В експлуатації електричні апарати можуть працювати в різних режимах:

– Тривалий режим – температура апарата досягає сталого значення і при цьому він може залишатися під навантаженням необмежено довго.

– Переривчасто-тривалий режим – апарат працює при сталому значенні температури, але час його навантаження обмежений технічними умовами.

– Повторно-короткочасний режим – у процесі роботи температура частин апарата не встигає досягти усталеного значення, а під час паузи не повертається до температури холодного стану.

– Короткочасний режим – за час навантаження температура елементів досягає сталого значення, а під час відсутності навантаження повертається до температури холодного стану.

– Режим короткого замикання – окремий випадок короткочасного режиму, коли температура частин апарата значно перевищує сталу температуру, характерну для нормального режиму.Захисні оболонки електричних апаратів

Для захисту персоналу від торкання з струмоведучими чи рухомими частинами та захисту апарату від проникнення в нього стороннього тіла в апараті встановлюються спеціальні оболонки.

Згідно ДОСТ 14254-80 захисні оболонки позначаються буквами IP та двома цифрами. Перша означає ступінь захисту від торкання персоналу до небезпечних деталей апарату, друга – захист від проникнення до апарату сторонніх тіл та рідин.

– IP00. Відкрите виконання. Захист персоналу від торкання до струмоведучих та рухомих частин відсутній. Сторонні тіла можуть проникати в середину апарату.

– IP20. Захищене виконання. Оболонка таких апаратів захищає від випадкового торкання до струмоведучих чи рухомих частин або від проникнення всередину апарату сторонніх предметів діаметром 12 мм, довжиною 80 мм.

– IP22. Додатково до властивостей виконання IP20 оболонка захищає від шкідливого дії крапель рідини, які падають на стінку оболонки під кутом 150 .

– IP23. Додатково до властивостей виконання IP20 оболонка захищає від дощу, падаючого під кутом 600 до вертикалі.

– IP40. Оболонка апарата захищає від проникнення всередину апарату дрібних предметів (діаметр більше 1 мм).

– IP42. Додатково до властивостей виконання IP40 оболонка захищає від дії крапель рідини, як у IP22.

– IP44. Додатково до властивостей виконання IP40 оболонка захищає від шкідливої дії бризок рідини, падаючої під будь-яким кутом до стінок оболонки.

– IP50. Оболонка апарата захищає від шкідливої дії пилу (допускається проникання всередину невеликої кількості талькової пудри, яка не порушує нормальної роботи апарату).

– IP60. Пилозахисне виконання. Оболонка повністю перешкоджає проникненню пилу (талькової пудри).

– IP65. Пиловодозахисне виконання. Додатково до властивостей виконання .

– IP60. Оболонка захищає від дії струменів рідини, падаючих під будь-яким кутом до її поверхні.

– IP66. Пиловодонепроникне виконання. Додатково до властивостей виконання IP60 оболонка забезпечує повний захист від проникнення води в середину апарату при дії струменів рідини, падаючих під будь-яким кутом до її поверхні (морське виконання).

– IP67. Герметичне виконання. Додатково до властивостей виконання IP60 оболонка забезпечує повну герметичність апарату.

Вплив механічних та кліматичних факторів на електричні апарати в умовах експлуатації регламентується діючими стандартами ДОСТ 15150-69, ДОСТ 5543-70.

Під кліматичними факторами розуміють вплив температури, вологості, тиску (висота над рівнем моря), дощу, вітру, снігу, пилу тощо. У технічних умовах на електричні апарати завжди даються значення кліматичних факторів, в межах яких забезпечується нормальна робота апарату.

У таблиці 2.1 наведено виконання в залежності від місця розташування електричних апаратів.

Таблиця 2.1 - Категорії розташування електричних апаратів для експлуатації

Категорії розташування для експлуатації	Позначення
На відкритому повітрі	1
Під навісом чи в приміщенні, де коливання температури і вологості не суттєво відрізняються від коливань на відкритому повітрі	2
У закритих приміщеннях з природною вентиляцією без штучної підтримки кліматичних умов	3
У приміщеннях з штучним підтриманням кліматичних умов	4
У приміщеннях з високою вологістю (неопалювані, невентильовані приміщення, шахти, підвали)	5

Потрібно зазначити, що на роботу електричних апаратів впливає атмосферний тиск. Від щільності повітря залежить міцність ізоляції та охолодження електричних апаратів.

Більшість електричних апаратів виготовляються для роботи на висоті 100 м над рівнем моря, але електричні апарати можуть працювати й на більшій висоті. При цьому у відповідних стандартах чи технічних умовах вказується зменшення номінального навантаження на кожні 100 чи 1000 м висоти, яка перевищує нормальну (1000 м).

При замовленні електричних апаратів потрібно вказувати:

- виконання,
- категорію розташування,
- тип середовища, в якому працює електричний апарат,
- максимальну висоту встановлення апарату над рівнем моря.

Кліматичне виконання та категорія розміщення вказуються в кінці скороченого позначення електричного апарату.

Комутаційні апарати розподільчих пристроїв

Рубильники та пакетні перемикачі

Рубильник призначений для ручного включення та відключення струму у колах з напругою джерела живлення 220/380 В при постійному та змінному струмі (рисунок 2.3).

Рисунок 2.3 – Рубільники для ручного включення та відключення струму у колах

Рубильники випускаються у одно-, двох- та трьохполюсному виконанні. На рис.2.4 зображено рубильник з центральною ручкою. Рухомий контакт – ніж 1 обертається у шарнірній стійці 2. При обертанні ручки за годинниковою стрілкою між ножем та контактом нерухомої стійки 3 загоряється дуга.

Гасіння дуги постійного струму при невеликих значеннях струму відбувається за рахунок механічного подовження дуги рухомим ножем. Чим більша швидкість руху контакту, тим більша швидкість дуги і менший час її горіння.

При відключенні великих струмів вирішальним фактором є електродинамічні сили. Ця сила, яка діє на одиницю довжини дуги, приблизно обернено пропорційна довжині ножа. У зв’язку з цим довжина ножа може бути досить малою та вибирається такою, щоб забезпечити гасіння малих струмів (менше 75 А).

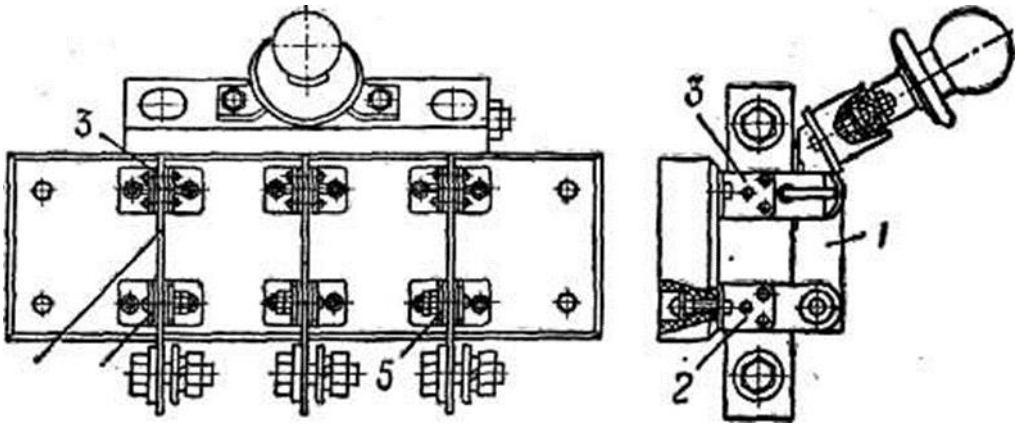


Рисунок 2.4 - Трьохфазний рубильник з центральною ручкою

Структура позначення рубильників Р та РП

$$\frac{Р(П)}{1}\ \frac{XX}{2}-\frac{XX}{3}\ \frac{X}{4}\ \frac{X}{5}\ \frac{X}{6}\ \frac{XX}{7}\ \frac{XX}{8}$$

1. - серія;
2. - позначення виду приводу ручки: 11 - бічна несъемная, 15 - бічна винесена, 16 - бічна винесена знімна, 19 передняя (центральна) несъемная;
3. - умовні позначення номінального току: 30 -80 А, 31 - 100 А, 34 - 300 А, 35 - 250 А, 36 - 320 А, 37 - 400 А, 38 - 500 А, 39 - 630 А;
4. - кількість полюсів: 1, 2, 3;
5. - наявність дугогасних камер: 1, 3, 5, 7 - із камерами, 2, 4, 6, 8 - без них;
6. - наявність допоміжних контактів: 0 - без допоміжних контактів,
7. - із ними;
8. - ступінь захисту: 00 - IP00, 32 - IP32, 54 - IP 54;
9. - кліматичне виконання і категорія розміщення ; У, ХЛ, Т (1 або 3).

Вибір рубильників

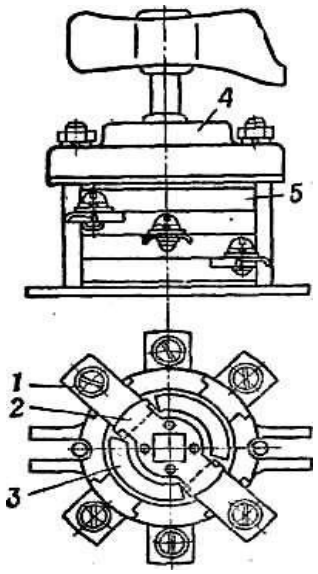
– по типу або серії;
– по номінальній напрузі: $U_H \geq U_C$.
– по виконанню вида приводу ручки; кількості полюсів; – наявності дугогасної камери;
– наявності допоміжних контактів.
– ступеню захисту;
– кліматичного виконання і категорії розміщення.

Пакетні вимикачі та перемикачі

Перемикач, на відміну від рубильників, має дві системи нерухомих контактів і три комутаційних положення: у середньому положенні ножів електричні кола розімкнуті (рисунки 2.5, 2.6).

Рисунок 2.5 – Пакетний перемикач ПКП Е9

Пакетні вимикачі та перемикачі є багатоступінчатими комутаційнимии апаратами, призначеними для нечастих комутацій у електричних колах з невеликою потужністю (струми до 400 А).



1– нерухомий контакт; 2 – рухомий контакт; 3 – щічки; 4 – приводний механізм; 5 – окремі пакети.

Рисунок 2.6 – Пакетний вимикач серії ПВМ.

Пакетний перемикач складається з кількох зв'язаних між собою пакетів та приводного механізму. Кожен пакет утворює один полюс перемикача і містить контактну та дугогасильну системи з двома розривами.

Нерухомі контакти виконані у вигляді масивних латунних пластин. Рухомий контакт насаджений на ізольований вал і має обертальний рух. Притискання забезпечується пружними властивостями контактних губок. Отвір у рухомому контакті часто має форму восьмигранної зірки, що дозволяє змінювати його положення відносно нерухомих контактів.

До рухомого контакту прикріплюються фіброві щічки, відстань між якими трохи перевищує товщину нерухомого контакту, що дає можливість вільного обертання. Перемикання здійснюється за допомогою приводного механізму, в якому при повороті рукоятки заводиться спеціальна пружина.

Принцип роботи та особливості пакетних перемикачів

У конструкції пакетного перемикача передбачена спеціальна засувка, яка не дозволяє валу повертатися разом із пружиною. Коли момент, створений пружиною, перевищує силу тертя в засувці, вал переходить у наступне комутаційне положення, де знову фіксується. Така система забезпечує необхідну швидкість руху контактів.

Переваги:

- компактність та зручність монтажу;
- гасіння дуги у замкнутому об'ємі без викиду полум'я чи газів;

– можливість одночасного керування великою кількістю кіл;
– висока стійкість до вібрацій і ударів.

Недолік:

– швидкий знос контактної системи та приводного механізму, що обмежує строк служби.

Допустима кількість комутацій:

– при номінальних струмах 10–60 А (U = 220 В) – близько 20 000 операцій;
– при струмах 100–400 А – близько 1 000 операцій;
– у сильно індуктивних колах ресурс скорочується приблизно удвічі.

Контактори та магнітні пускачі

Контактор – це одноступеневий апарат, призначений для частих дистанційних вмикань та вимикань силових електричних кіл у нормальних режимах роботи.

Загальний вигляд контакторів показано на рис. 2.7.

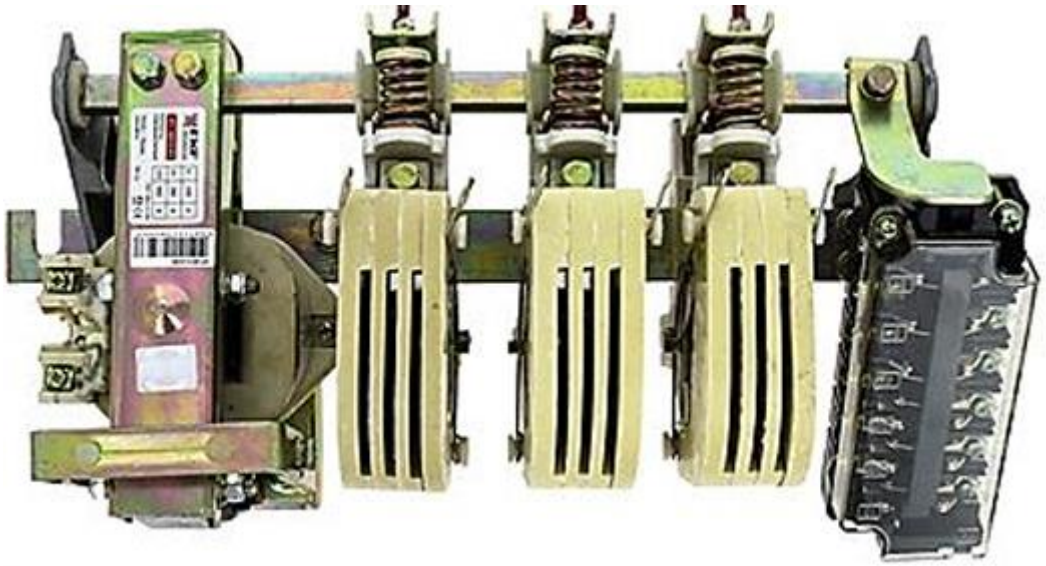


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд контакторів електромагнітних КТ

Види контакторів за родом енергії привода

– Електромагнітні – спрацьовують під дією сил електромагніта.
– Гідравлічні – керуються за допомогою сил стиснутої рідини.
– Пневматичні – працюють завдяки дії стиснутого повітря.
– Напівпровідникові (електронні) – спрацьовують шляхом керування силовими тиристорами.

Контактори постійного струму

Контактори постійного струму застосовуються у колах постійного струму й поділяються на:

– силові контактори – для замикання та розмикання силових електричних кіл;

– контактори прискорення – для закорочування окремих ступенів пускового реостата при пуску двигунів постійного струму.

Будова електромагнітних контакторів.

Магнітопровід розділений на дві частини: нерухому (закріплену в основу з термостійкої пластмаси) та рухому (з контактами для комутації кола). На середньому стержні Ш-подібного магнітопроводу розташована електромагнітна котушка, яка керує роботою апарата. Електромагнітна система включає реле контролю часу вмикання, діодний випрямляч, комутатор котушок, а також пускову і утримуючу котушки. Така конструкція забезпечує нормований час вмикання, мінімальне енергоспоживання в режимі утримання (до 10 Вт) і виключає можливість «прозвонки» тестером.

Додаткове обладнання.

До контакторів можуть приєднуватися контактні приставки (ДК) та пневматичні приставки витримки часу (БЗ).

Принцип дії.

Коли через котушку протікає струм, у ній виникає магнітне поле, яке замикає дві частини магнітопроводу, долаючи опір пружин. При цьому силові контакти замикаються й відбувається комутація кола.

Для усунення вібрацій з частотою 50 Гц у полюсні стержні магнітопроводу встановлюють масивні короткозамкнуті алюмінієві кільця.Контактори змінного струму в залежності від мережі змінного струму бувають промислової частоти (50 Гц) та підвищеної частоти (до 10 кГц).

Структура позначень контакторів

КМ	15	–	XX	X	X	X	X	X	00	XX
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10

1. контактор електромагнітний;
2. номер серії;
3. номінальний струм: 33 – 160А; 35 – 250А; 37 – 400А; 39 – 630А;
4. режим роботи: « - » переривчасто-тривалий; С – тривалий;
5. рід струму головного кола і кола керування: 3 – головне коло змінного струму, котушка постійного струму; 4 - головне коло постійного струму, котушка змінного струму; 5 - головне коло і котушка постійного струму;
6. кількість головних замикаючих контактів: 1,2,3,4,5;
7. кількість головних розмикаючих контактів: 0 – відсутні, 1 – один контакт;

8. наявність допоміжних контактів і механічним блокуванням: 1 – з допоміжним контактом без механічного блокування; 3 - з допоміжним контактом з механічним блокуванням;

9. ступінь захисту IP00;

10. кліматичне виконання і категорія захисту: У3; ХЛ3;Т3.

Вибір контакторів

Вибір контакторів (КМ) виконується за такими показниками і умовам

1. За типом або серією;
2. За номінальною напругою з умови:

$$U_{\text{НКМ}} \geq U_{\text{М}},$$

де $U_{\text{НКМ}}$ – номінальна напруга магнітного контактора, В

3. За номінальним струмом магнітного контактора з умови

$$I\text{НКМ} \geq I_P,$$

де $\text{I}_{\text{НКМ}}$ – номінальний струм контактора, А;

$\text{I}_{\text{р}}$ – розрахунковий струм електричного споживача, А.

4. За виконанням:

– кількості головних замикаючих і розмикаючих контактів;

– модифікацією КМ;

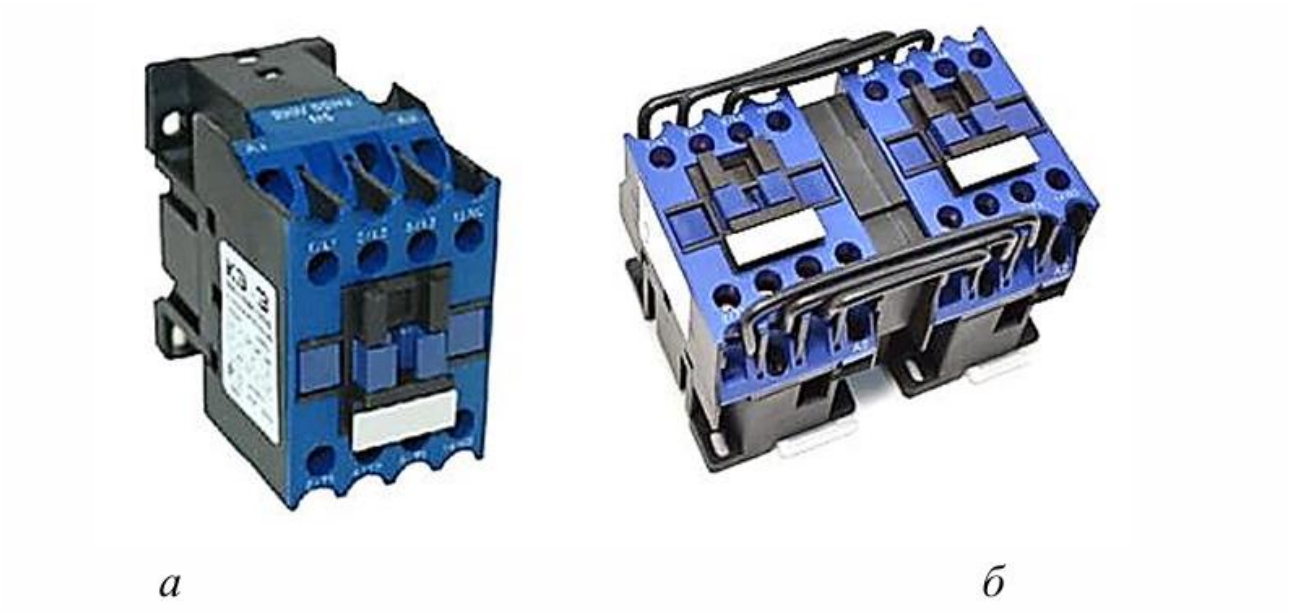
– комутаційної зносостійкості;

– наявність допоміжних контактів і механізму, що защіпкує.

5. За режимом роботи: тривалий, короткочасний, повторнокороткочасний.
6. За родом струму головного кола і кола керування.
7. За номінальною напругою котушок, що втягують: змінного струму – 24, 127, 220, 380 і 660 В; постійного струму – 24, 48, 110, 220 В.
8. За ступенем захисту і категорією розміщення.
9. За кліматичним виконанням і категорією розміщення.

Магнітні пускачі

Магнітний пускач – комутаційний електричний апарат, який використовується в основному для управління роботою (пуску в хід та зупинки) асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором (рисунок 2.8).



а *б*

а- нереверсивний, б- рнверсивний

Рисунок 2.8 – Загальний вигляд магнітних пускачів ПМ

Магнітні пускачі

За конструкцією та принципом дії магнітні пускачі подібні до контакторів. Їх відмінною рисою є наявність вбудованого теплового реле, яке забезпечує захист електродвигуна від перевантажень та від обриву однієї з фаз.

Водночас теплове реле не забезпечує захист від струмів короткого замикання. Тому для повного захисту двигуна додатково застосовуються запобіжники.

Структура позначень магнітних пускачів

$$\underset{1}{\underline{ПМЛ}} - \underset{2}{\underline{X}}\ \underset{3}{\underline{X}}\ \underset{4}{\underline{X}}\ \underset{5}{\underline{X}}\ \underset{6}{\underline{XX}}\ \underset{7}{\underline{X}}$$

1. серія;
2. номінальний струм: 1 -10А; 2-25А; 3-40А; 4-63А; 5-80А; 6-125А; 7-200А
3. виконання за призначенням і наявністю теплового реле:
   - нереверсивний без теплового реле;
   - нереверсивний з тепловим реле (ТР);
   - реверсивний без ТР з електричною і механічною блокіровкою;
   - реверсивний з ТР з електричною і механічною блокіровкою;
   - перемикання обмотки статора Y/Δ.
4. виконання за ступенем захисту від впливу навколишнього середовища і наявністю кнопок:
   - 0 - IP00;
   - 1 - IP54 з кнопкою «реле»;
   - 2 - IP54 з кнопками «пуск і стоп»;

– 3 - IP54 з кнопками «пуск і стоп» та сигнальною лампою;

5. кількість допоміжних блок-контактів:

- 0 – 1з (10,25А) 1з+1р (40-200А)
- 1– 1р (10,25А) 2з+2р (40-200А)
- 2 – 3з+3р - 40 – 200А
- 4 – 5з+1р - 40 200А
- 5 – 1з на 10, 25А – струм котушки - постійний
- 6 – 1р на 10, 25А - струм котушки - постійний

6. кліматичне виконання і категорія розміщення

7. клас електричної стійкості при спрацюванні (А, Б, В).

Вибір магнітних пускачів виконується за такими показниками і умовами

– За типом і серією.

– За номінальною напругою з умови

$$U_{\text{НМП}} \geq U_{\text{М}},$$

де $U_{НМП}$ – номінальна напруга магнітного пускача, В;

– За номінальним струмом МП з умови

$$I_{\text{НМП}} \geq I_{P},$$

де $I_{НМП}$ – номінальний струм магнітного пускача, А;

– За виконанням:

а) реверсивний, нереверсивний;

б) з тепловим реле, без теплового реле;

в) з електромеханічним блокуванням, без блокування.

– За номінальним струмом неспрацьовування теплового реле серії РТЛ і РТТ з умови

$$I\text{НМП} \geq I\text{НАД} \quad \text{або} \quad I\text{ННТР} \geq IP,$$

де $I_{НМП}$ – номінальний струм магнітного пускача, А;

$I_{НАД}$ – номінальний струм асинхронного електродвигуна, А;

$I_{ННРТ}$ – номінальний струм не спрацювання теплового реле, А

$I_р$ – розрахунковий струм електричного споживача, А.

з наступним регулюванням струму неспрацьовування теплового реле, щоб забезпечувалася рівність

$$I_{\text{ННТР}} \geq I_{\text{НАД}} \text{ або } I_{\text{ННТР}} \geq I_{\text{Р}}.$$

– За ступенем захисту і наявності кнопки «Пуск» і «Стоп».
– За кількістю допоміжних контактів.
– За родом струму і напрузі котушки, що втягує, магнітного пускача
– За кліматичним виконанням і категорією розміщення.
– За виконанням на комутаційну стійкість.

Автоматичні вимикачі

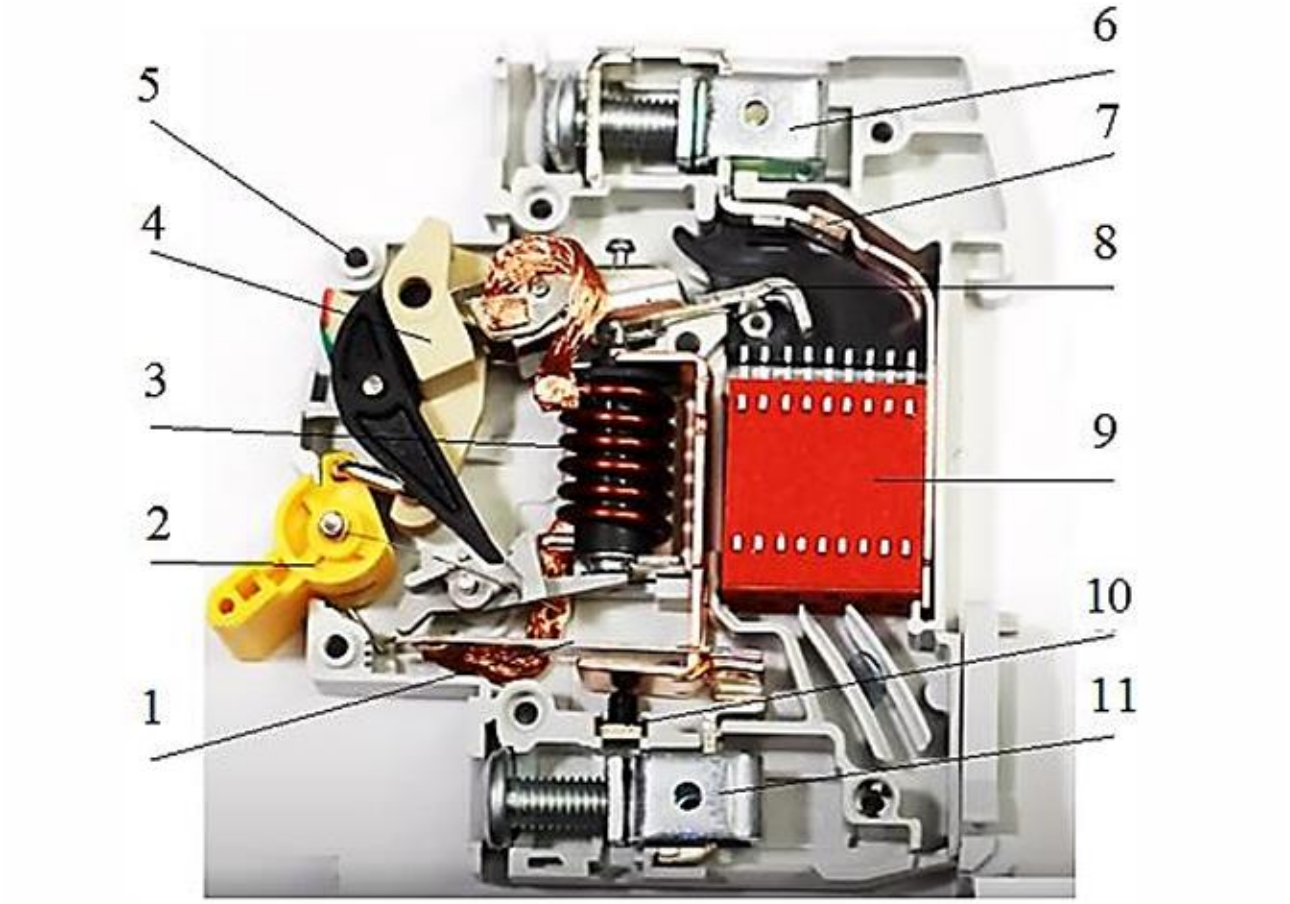
Автоматичні вимикачі (АВ) – це комутаційні апарати, призначені для автоматичного вимикання електричних кіл при аварійних режимах, а також для їх ручного вмикання та вимикання у нормальних умовах.

Основні функції:
– захист кіл від струмів короткого замикання;
– захист від перевантажень;
– обмежене використання для нечастих комутацій під навантаженням.

У конструкції автоматичного вимикача передбачені:
– тепловий розчіплювач, що реагує на тривалі перевантаження;
– електромагнітний розчіплювач, який миттєво спрацьовує при коротких замиканнях;
– дугогасильна система, що забезпечує швидке гасіння електричної дуги.

Завдяки поєднанню функцій захисту та комутації автоматичні вимикачі широко застосовуються в електроприводах і системах електропостачання..

Рисунок 2.9 – Загальний вигляд автоматичного вимикача



5 – корпус; 4 – механізм взводу та розчеплення, що взаємопов'язаний з важелем керування; 3 – електромагнітний розчіплювач – це котушка (електромагніт) та рухоме осердя (якір), яке виконує функцію штовхача; ці елементи в сукупності забезпечують захист від струмів КЗ (рис. 7.15, а); 2 – рукоятка ручного увімкнення/відмикання; 1 – тепловий розчіплювач (біметалева пластина), що забезпечує захист від підвищеного навантаження; 10 – регулювальний гвинт теплового розчіплювала, за допомогою якого забезпечується регулювання значення струму, при якому розчіплювач повинен спрацювати.; 6, 11 – верхня та нижня (відповідно) гвинтові клеми підключення; 7, 8 – нерухомий і рухомий (відповідно) силові контакти, що забезпечують комутацію; 9 – дугогасна камера, що виконує швидке гасіння дугового розряду, який утворюється під час розмикання контактів.

Рисунок 2.10 - Конструкція автомату

Будова та принцип дії автоматичних вимикачів

Автоматичні вимикачі оснащені двома типами захисту:

– тепловим розчеплювачем – захищає коло від тривалих перевантажень, конструктивно виконаний на основі біметалічної пластини;

– електромагнітним розчеплювачем – спрацьовує при короткому замиканні, реалізований у вигляді соленоїда.

Струмовий розчеплювач виготовляється зі сталі з мідним покриттям і має контакти зі срібловмісного сплаву. Для гасіння дуги застосовується дугогасильна камера, що складається з набору пластин, та активний дугогасильний контакт, які підвищують комутаційну зносостійкість і граничну здатність вимикача.

Надійне приєднання провідників забезпечують комбіновані зажими з оцинкованої сталі та посрібленої латуні. На лицьовій панелі передбачений індикатор стану (ВКЛ/ВИКЛ).

Принцип дії:

– При перевантаженні струм нагріває біметалічну пластину, яка вигинається та впливає на механізм вільного розчеплення, внаслідок чого контакти розмикаються.

– При короткому замиканні струм у котушці електромагніта різко зростає, посилене магнітне поле переміщує осердя, що також діє на механізм вільного розчеплення.

– У обох випадках рухомий контакт відходить від нерухомого, коло розривається, і навантаження захищається від аварійного режиму.

Основні параметри автоматичних вимикачів

До основних параметрів автоматичних вимикачів належать:

– номінальна напруга – робоча напруга, на яку розрахований автомат;

– номінальний струм – значення струму, який апарат може тривало пропускати без пошкоджень;

– максимальний струм відключення – найбільший струм короткого замикання, який автомат здатен безпечно вимкнути;

– номінальний струм розчеплювача – значення струму, при якому спрацьовує розчеплювач;

– часові характеристики: власний та повний час відключення.

Власний час відключення – це інтервал від моменту досягнення струмом у колі значення, що відповідає уставці розчеплювача, до початку розходження головних контактів вимикача.

Повний час відключення автомата

$$t_{\text{відкл.}} = t_0 + t_1 + t_2 \ ,$$

де t0 – власний час відключення автоматичного вимикача, с; t1 – час до моменту повного розмикання головних контактів, який витрачається на роботу розчеплювачів, с; t2 – час горіння електричної дуги між контактами, що розходяться, с.

Час t1 залежить від способу розчеплення, конструкції контактів, маси рухомих частин та інших факторів.

Якщо t1 ≥0,01 с, то автоматичний повітряний вимикач називається звичайним (нешвидкодіючим).

Якщо t1 =0,002÷0,008 с, то автоматичний повітряний вимикач – швидкодіючий.

Дугогасна система та приводи автоматичних вимикачів

Автоматичні вимикачі повинні забезпечувати надійне гасіння дуги у всіх можливих режимах роботи мережі.

У вимикачах старих конструкцій застосовували два типи дугогасильних систем: напівзакриті та відкриті. У напівзакритих вимикачах дуга гаситься в кожусі з отворами для виходу гарячих газів. Об'єм кожуха робиться достатньо великим, щоб уникнути надмірного тиску всередині, а зона викиду іонізованих газів становить кілька сантиметрів. Таке виконання характерне для вимикачів з ручним керуванням, які встановлюються у розподільчих пунктах і працюють при струмах до 50 кА.

Для струмів 100 кА і вищезастосовуються відкриті камери з великою зоною викиду. Їх використовують у швидкодіючих вимикачах на великі граничні струми та напруги понад 1000 В.

У сучасних вимикачах масового використання широко застосовуються деіонні решітки зі сталевих пластин. Вони ефективні як для змінного, так і для постійного струму, оскільки на кожну пару пластин припадає не менше 25 В напруги. Гасіння дуги в таких системах відбувається стабільно і з мінімальним виділенням іонізованих газів.

При ще більших струмах використовуються лабіринтно-щілинні камери та камери з прямою щілиною. У таких системах дуга втягується у щілину за допомогою магнітного дуття. У лабіринтно-щілинній камері дуга додатково охолоджується стінками, виготовленими з матеріалів із високою теплопровідністю та температурою плавлення (наприклад, кордієрит). Поздовжньо-щілинні камери можуть мати кілька паралельних щілин, що знижує аеродинамічний опір і полегшує входження дуги. Спочатку дуга розгалужується на кілька гілок, але остаточне гасіння відбувається в одній з них. Для таких камер застосовують стінки та перегородки з азбоцементу.

У сучасних вимикачах спрощеної конструкції (на струми до 225 А) використовують дугогасильні решітки з нікельованими сталевими вкладишами. Для струмів від 250 А і більше додатково встановлюють розпилювачі дуги у вигляді перфорованих сталевих або нікельованих пластин, змонтованих у кришці вимикача.

Приводи автоматичних вимикачів

Привід автоматичного вимикача забезпечує передачу зусилля на контакти, необхідного для вмикання апарата навіть у найважчих умовах, зокрема при дії струмів короткого замикання.

За конструкцією приводи поділяють на ручні та електромеханічні.

Ручні поворотні приводи застосовуються для перетворення обертального руху в поступальний з метою керування автоматичним вимикачем. Їх доцільно використовувати при номінальних струмах до 200 А. При більших струмах потрібні електромеханічні приводи, які забезпечують необхідну швидкість наростання контактного тиску.

Електромагнітний привід – це електромеханічний пристрій для дистанційного керування (вмикання/вимикання) вимикачем, оснащений також ручним управлінням та аварійною кнопкою відключення. Такі приводи особливо зручні в системах телеуправління та енергозбереження. У старих серіях автоматів вони використовувалися при струмах до 600–1000 А, у сучасних – до 1600 А.

Привід може закріплюватися на дверцятах розподільчого пункту (для вимикачів з номінальним струмом 250–1600 А) або безпосередньо на вимикачі (для апаратів на 125–160 А). Положення приводу відповідає положенню рукоятки вимикача: «вимкнено», «увімкнено», «спрацювання».

У вимикачах з номінальним струмом до 400 А електромагнітні приводи безпосередньо впливають на рукоятку вимикача, виконуючи команди від зовнішніх кнопок «Вкл»/«Викл». При струмах від 250 А і вище використовуються пружинні системи: під час відключення пружина заводиться, а запасена енергія витрачається на наступне вмикання. Для відключення вимикача у цьому випадку застосовують незалежний розчіплювач.

Розчіплювачі автоматичних вимикачів

У старих зразках автоматичних вимикачів найбільшого поширення набули максимальні розчіплювачі, серед яких застосовуються електромагнітні та теплові системи.

Електромагнітні розчіплювачі прості за конструкцією, відзначаються високою термічною та динамічною стійкістю і не чутливі до вібрацій. Якір має вільний хід (5–10 мм), а розчеплення здійснюється ударом, при якому основну роль відіграє кінетична енергія якоря. Для створення витримки часу між електромагнітом і механізмом вільного розчеплення використовують спеціальні пристрої затримки, час яких не залежить від величини струму. Тому такі розчіплювачі не забезпечують захист від перевантажень.

Теплові розчіплювачі забезпечують витримку часу, що залежить від струму. Їх часо-струмова характеристика добре узгоджується з режимами захищуваного об’єкта, проте існує низка недоліків:

– Низька термічна стійкість, що потребує миттєвого відключення при великих струмах. Тому часто застосовується комбінація: електромагнітний розчіплювач працює при коротких замиканнях, а тепловий – при перевантаженнях.

– Зі зростанням струму автомата збільшується зусилля, необхідне для спрацювання, тому теплові розчіплювачі використовуються при струмах до 200 А.

– Їх витримка часу залежить від температури навколишнього середовища, що знижує точність і надійність роботи.

– Похибка у струмі спрацювання приблизно удвічі більша, ніж у електромагнітних розчіплювачів.

– Створення теплових розчіплювачів на великі струми пов’язане зі значними труднощами. Використання шунтів та трансформаторів струму збільшує габарити вимикача.

– Через малу термічну стійкість допускається лише короткочасне протікання струмів короткого замикання.

Сучасні розчеплювачі автоматичних вимикачів

У сучасних автоматичних вимикачах застосовуються розчеплювачі, що дозволяють здійснювати дистанційне керування та забезпечують додатковий захист обладнання. Основними типами є незалежний розчіплювач і розчіплювач мінімальної напруги.

Незалежний розчіплювач використовується для дистанційного відключення вимикача. Після подачі напруги в коло керування його електромагнітний механізм розмикає головні контакти вимикача. Поворотна рейка впливає на допоміжні контакти розчіплювача, які блокують повторну подачу напруги. Це дозволяє відмовитися від окремого захисту кола живлення незалежного розчіплювача. Після дистанційного вимкнення повторне вмикання виконується вручну.

Розчіплювач мінімальної напруги відключає вимикач при зниженні фазної чи лінійної напруги на вводі до 70% від номінального і блокує його повторне вмикання, якщо напруга залишається нижчою за 85%. Основне призначення – відключення електрообладнання при недопустимому зниженні напруги. За потреби його можна використовувати як незалежний розчіплювач, підключивши в коло керування кнопковий вимикач із розмикаючим контактом: короткочасне розмикання такого контакту призведе до відключення автоматичного вимикача.

Електромеханічні реле.

Призначення.

Електромеханічні реле застосовуються для контролю електричних та неелектричних параметрів. У першому випадку вони виконують функції реле, у другому – датчиків.

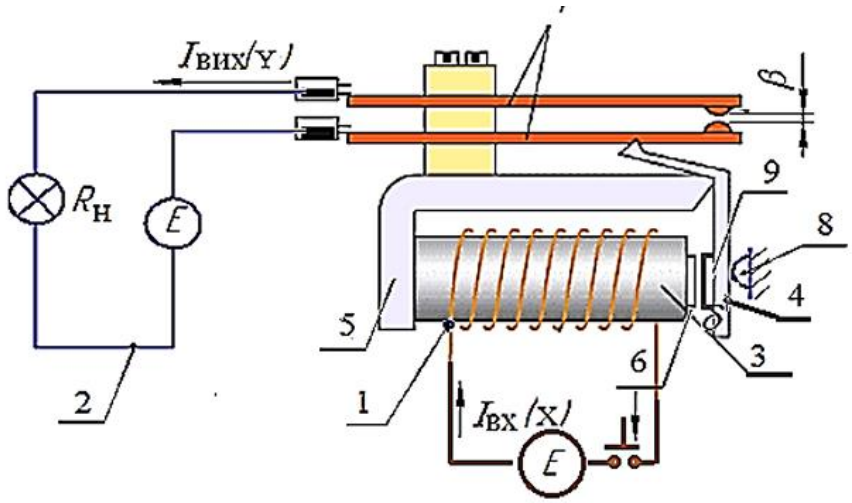
Будова.

Типове електромеханічне реле складається з рухомої та нерухомої контактних пластин, контактів, якоря, осердя, обмотки електромагніта, ярма та ізоляційної пластини.

Принцип дії.

Робота реле базується на явищах електромагнетизму та дії електромагнітної сили на провідник зі струмом у магнітному полі. Коли через обмотку протікає струм, створене магнітне поле діє на феромагнітний якір, що викликає його переміщення та спрацьовування контактної системи.

Наприклад, у реле струму (рис. 2.11) при досягненні контрольованим струмом заданого значення відбувається спрацьовування реле. Це проявляється у замиканні чи розмиканні контактів у контактних реле або у різкій зміні напруги на виході у безконтактних реле. Таким чином формується вихідний сигнал, який може бути використаний у схемах автоматики та захисту.



1 – обмотка кола керування; 2 – коло комутації (навантаження); 3, 4, 5 – магнітне коло (3 – осердя, 4 – якір, 5 – ярмо); 6 – полюсний наконечник; 7 – контакт-деталі; 8 – упор; 9 – штифт відлипання.

Рисунок 2.11 – Конструкція найпростішого електромеханічного реле струму

У реле струму при збільшенні вхідного струму $\boldsymbol{I}_{вх}$ в обмотці до певного значення якір притягується до сердечника. У процесі цього руху верхній кінець якоря деформує контактну пластину вгору, внаслідок чого замикаються контакти. Після цього у вихідному колі починає протікати струм, який після закінчення перехідного процесу набуває значення $\boldsymbol{I}_{вих}$. При подальшому збільшенні вхідного струму величина вихідного струму не змінюється.

Коли вхідний струм зменшується до певного рівня, сила притягання якоря стає меншою за силу пружності контактних пластин, і якір повертається у вихідне положення.

Основна характеристика електромеханічних реле – це їх релейна характеристика, яка відображає залежність вихідного сигналу (вихідного параметра) від величини вхідного сигналу.

Класифікація електромеханічних реле

Реле можна класифікувати по наступним признакам:

– В залежності від фізичної природи управляючого сигналу

- Електричні – реагують на електричний сигнал – струм, напругу, потужність, опір кола та ін..
- Теплові – реагують на кількість виділеної теплоти, температуру
- Механічні - реагують на силу, тиск, швидкість , переміщення.

– В залежності від виконуючих функцій

Електричні реле діляться на : логічні і вимірювальні.

Логічні реле призначені для спрацювання або поверненні в вихідне становище зміною вхідної величини.

Вимірювальні реле постійно знаходяться під напругою і слідкують за зміною вхідної величини. Якщо це реле максимальної напруги, то воно спрацює коли напруга досягне максимальної позначки уставки цього реле, якщо це реле мінімальної напруги, то воно спрацює коли напруга досягне мінімальної позначки уставки цього реле. Уставка реле – це задане значення якоїсь величини, при якому реле повинно спрацювати.

– В залежності від вимірювальної величини

Бувають реле струму, напруги, активної потужності, реактивної потужності, зсуву фаз, повного опору, частоти і т.д.

На вхід вимірювального реле в отличии від логічного реле можна подавати декілька сигналів. Наприклад на реле потужності подається струм і напруга. Тому ці дві величини формують одну величину – потужність.

Електричні реле як логічні так і вимірювальні бувають з нормованим часом і не нормованим часом. Так звані реле часу. Дані реле спрацьовують при певних умовах в залежності від уставки витримки часу.

Проміжні реле призначені для передачі команд з одного електричного кола в інше. Взагалі їх використовують для розширення функцій других реле. Це найбільш поширений тип реле.

– В залежності від наявності або відсутності механічного переміщення

Це так звані контактні і безконтактні реле. Різниця між ними заключається в тому, що електромеханічні контактні реле вихідним колом керують контакти (при розімкнених контактах вихідна величина Y=0), а у безконтактних реле при відсутності вхідної величини X вихідна величина не може бути меншою деякої Yмін, яка визначається струмом холостого ходу. (напівпровідникові і магнітні підсилювачі і.т.д.).

– В залежності від явищ всередині реле.

Наприклад – реле електромагнітне або магнітоелектричне, або теплове. З другої сторони – це герконове реле – це реле з магнітоуправляючим герметезованим контактом.

– По роду струму

Постійного і змінного струму. У деяких реле із зміною напруги котушки змінюють короткозамкнений виток з мідного на стальний. На змінному струмі мідний короткозамкнений виток призначений для зниження вібрації якоря, а на постійному струмі стальний короткозамкнений виток виконує функцію полюсного наконечника – тобто робить тягову х-ку більш пологою, збільшуючи силу при максимальному зазорі.

Основні параметри електромеханічного реле

– Величина спрацювання Хспр. значення вхідного сигналу, при якому відбувається стрибкоподібне збільшення вихідної величини (для замикального контакту – момент замикання).

– Величина повернення Хпов – значення вхідного параметра, при якому реле повертається у вихідний стан. Характеризується співвідношенням параметра відпускання до параметра спрацювання

– Коефіцієнт запасу Кз - відношення номінального робочого вхідного сигналу до величини спрацювання.

– Коефіцієнт підсилення – відношення номінального робочого вхідного сигналу до величини спрацювання.

– Розмноження кіл – відношення кількості вихідних кіл до кількості вхідних кіл

– Чутливість – мінімальна потужність у вхідному колі, яка необхідна для спрацювання реле; один із найважливіших параметрів, що визначає ефективність роботи пристрою.

– Потужність спрацьовування складає:

- для високочутливих реле Рспр<0,01 Вт;
- для чутливих Рспр<0,1 Вт;
- для низькочутливих реле Рспр>0,1 Вт.

Комутаційні характеристики реле

Комутаційна зносостійкість визначається кількістю комутацій без врахування навантаження в колі. Розрізняють два види режимів роботи реле:

- Режим нормальної комутації, коли контакт комутує коло багатократно.
- Режим рідких комутацій, коли контакт комутує коло декілька раз, або декілька десятків раз.

До основних параметрів комутації кола відносяться: $U_ж$ - напруга живлення; I_0 – струм (постійний чи змінний); частота змінного струму; Те - електромагнітна постійна часу для кіл постійного струму (cosφ – для кіл змінного струму).

Реле часу

Реле часу – це логічні реле з нормованим часом спрацьовування. Вони призначені для утворення заданих витримок часу під час передачі сигналів з одного кола в інше і набули широкого розповсюдження в схемах автоматизованого електропривода, пристроях автоматики, телемеханіки, релейного захисту тощо (рисунок 2.12).

а) б) в)

Рисунок 2.12 – Зовнішній виглід різних реле часу

Серед реле часу найбільш широкого розповсюдження набули електромагнітні реле часу, в яких використовуються магнітні системи постійного і змінного струму з магнітним і механічним демпфіруванням.

Магнітним демпфіруванням називається спосіб впливу на швидкість зміни магнітного потоку в магнітопроводі при включенні або виключенні реле.

Спеціальних апаратів захисту. Загальні відомості, принцип будови.

Під час експлуатації електроприводів захист електродвигунів від перевантажень та інших анормальних режимів автоматичними вимикачами, запобіжниками та тепловими реле не задовольняє вимогам високої надійності. Тоді використовують спеціальні апарати захисту

Для ряду електроприводів з важкими умовами роботи (приводи гній збиральних транспортерів, роздавачів кормів, змішувачів тощо) застосовується температурний захист електродвигунів УВТЗ. При цьому контролюється основний фактор, що може спричинити вихід із ладу двигуна - температура його обмоток.

До таких спеціальних апаратів захисту відноситься пристрій вмонтованого температурного захисту типу УВТЗ-1, що призначено для запобігання перегріву статорних обмоток асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором сільськогосподарського призначення. Електродвигуни працюють у тваринницьких приміщеннях із хімічно активним середовищем, під навісом і на відкритому повітрі.

Принцип дії

При зміні температури навколишнього середовища змінюється опір. Промисловість також випускає напівпровідникові терморезистори: термістори – з негативним температурним коефіцієнтом і позистори – з позитивним температурним коефіцієнтом опору. різницю між ними заклечається в тому, що у термісторів первинний перетворювач

виробляється із мідно-марганцевих і кадмієво-марганцевих напівпровідникових порошків із спеціальними добавками, а у позисторів первиний перетворювач виготовляється із титаната-барія і спецдобавок. У термісторів із збільшенням температури опір падає, а у позисторів – опір росте.

Перетворювачі теплоти встановлюють в асинхронному електродвигуні (по одному на фазу) при його виготовленні або капітальному ремонті, а також у процесі експлуатації в лобових частинах і з боку вільного кінця валу. Між собою їх з'єднують послідовно ізольованими мідними проводами з перетином не менше 0,5 мм2, а вільні кінці виводять у коробці виводів і заміряють опір усього кола терморезисторов, що при температурі 20±5°С повинно бути в межах 120…150 Ом.

Реле захисту двигуна

Реле захисту двигуна із цифровим настроюванням і індикацією контрольованих параметрів **призначене** для захисту трифазних асинхронних електродвигунів 3х127/220 В, 3х220/380 В (у тому числі глибинних насосів) від наслідків:

- перевантажень;
- асиметрії навантаження;
- роботи з недовантаженням;
- перевищення напруги живлення;
- зниження напруги живлення;
- зворотного чергування фаз при включенні реле;
- зниження опору ізоляції перед пуском двигуна і комутації електричних кіл при досягненні контрольованими параметрами певних, попередньо запрограмованих рівнів.

Висновки.

1. Електричні апарати – це спеціалізовані електротехнічні пристрої, призначені для комутації, керування, контролю, вимірювання та захисту електричних кіл, які забезпечують надійну роботу обладнання та безпеку персоналу.
2. Вони поділяються на різні групи за призначенням (комутаційні, пускорегулюючі, контролюючі, вимірювальні, захисні), родом струму (постійного чи змінного), принципом дії (електромагнітні, теплові, індукційні тощо), а також за областю застосування (низьковольтні й високовольтні).
3. Робота електричних апаратів ґрунтується на низці фізичних явищ: тепловій дії струму, електромагнетизмі, електромагнітній індукції, дії електромагнітної сили, що визначає їх конструкцію та функціональні властивості.

4. Електромагніти для тягових зусиль, котушки, магнітопроводи та інші конструктивні елементи повинні відповідати вимогам щодо надійності, теплової та механічної стійкості, мінімізації втрат енергії.

5. У роботі апаратів проявляються ефекти змінного струму (поверхневий ефект, ефект близькості, гістерезис, вихрові струми), що впливають на їх нагрівання та довговічність.

6. Режими експлуатації електричних апаратів (тривалий, короткочасний, повторно-короткочасний) визначають їх теплові та динамічні характеристики і враховуються під час вибору й експлуатації.

7. Захисні оболонки (ступені IP) та кліматичні виконання забезпечують працездатність апаратів у різних умовах середовища (вологість, пил, температура, висота над рівнем моря).

8. До основних представників комутаційних і захисних апаратів належать:

9. Рубильники та пакетні перемикачі – для ручної комутації;

10. Контактори та магнітні пускачі – для дистанційного керування двигунами та силовими колами;

11. Автоматичні вимикачі – для захисту від перевантажень і струмів короткого замикання;

12. Реле (електромеханічні, часу, захисту) – для автоматизації, контролю та підвищення безпеки.

13. Спеціальні апарати захисту (терморезистори, реле захисту двигунів з цифровим настроюванням) підвищують надійність електроприводів у важких умовах експлуатації.

14. Правильний вибір і експлуатація електричних апаратів є ключем до забезпечення надійності, безпеки і довговічності систем електроприводу.

Контрольні питання.

1. Що таке електричний апарат і які його основні функції?

2. Які основні групи електричних апаратів ви знаєте? Наведіть приклади.

3. За якими ознаками класифікують електричні апарати?

4. Які основні вимоги висуваються до електричних апаратів під час експлуатації?

5. У чому полягає фізична суть явища теплової дії струму? Як воно використовується в апаратах?

6. Поясніть застосування явищ електромагнетизму та електромагнітної індукції в електричних апаратах.

7. Де використовується явище електромагнітної сили?

8. Які основні конструктивні елементи електромагнітів для тягових зусиль?

9. Як класифікуються електромагніти за родом струму, способом дії та рухом якоря?

10. Які існують види теплопередачі в електричних апаратах?

11. Що таке поверхневий ефект і ефект близькості? Як вони впливають на роботу апаратів?

12. Які основні режими експлуатації електричних апаратів?

13. Яке призначення захисних оболонок і що означають ступені захисту IP?

14. Які механічні та кліматичні фактори впливають на роботу апаратів?

15. Опишіть будову та принцип дії рубильника. У чому його відмінність від пакетного перемикача?

16. Які особливості будови та принципу дії контакторів? Які їхні різновиди?

17. Чим магнітні пускачі відрізняються від контакторів?

18. Які функції виконують автоматичні вимикачі? Як вони захищають електричні кола?

19. Які основні параметри враховуються при виборі автоматичних вимикачів?

20. Які існують види дугогасних систем в автоматичних вимикачах?

21. У чому особливість роботи теплового та електромагнітного розчеплювачів?

22. Що таке електромеханічні реле? Як класифікуються реле за функціями та видом вимірюваної величини?

23. Які основні параметри характеризують роботу електромеханічного реле?

24. Що таке реле часу? Де воно застосовується?

25. Які спеціальні апарати захисту використовуються для електродвигунів?

26. Поясніть принцип дії термісторів і позисторів у пристроях теплового захисту.

27. Які параметри контролює реле захисту двигуна з цифровим настроюванням?,

Використана література.

1. Апарати керування і захисту: курс лекцій / В.С. Попрядухін. Мелітополь : ТДАТУ, 2019. 190 с.

ТЕМА 3. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ: КОНСТРУКЦІЯ, ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ РЕЖИМИ, ТИПОВІ НЕСПРАВНОСТІ. МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ТА РЕМОНТУ

Будова та класифікація електричних машин. Особливості роботи асинхронних і синхронних двигунів. Причини відмов, методи діагностики та ремонту.

Основні визначення, класифікація електричних машин

Передумовами для створення електричних машин (ЕМ) стали: відкриття Ерстедом у 1820 р. явища електромагнетизму (вплив струму, що протікає по провіднику на магнітну стрілку); відкриття Фарадеєм у 1822 р. електромагнітного обертання – провідник зі струмом прагне обертатися навколо магнітного полюса; відкриття Фарадеєм у 1831 р. явища електромагнітної індукції.

Не менш важливими є роботи ректора Петербурзького університету Е. Л. Ленца, що відкрив у 1833 р. зв'язок між напрямами струмів та їхнім електромагнітним та електродинамічним впливом. Їм сформульовані принципи зворотності ЕМ та закон теплової дії струму. У наступні роки роботи Ленца зв'язані з роботами російського академіка Б. С. Якобі – винахідника першого електродвигуна з обертальним рухом (1834 р.).

Першу практичну установку змінного струму створив П. Н. Яблочков у 1878 р. Його генератор став прототипом сучасних синхронних машин. Їм же створений перший у світі трансформатор (1876 р.) І все ж перевага віддавалася постійному струму, тому що не існувало достатньо досконалого двигуна змінного струму.

Остаточна перевага змінного струму встановилася після розробки М. О. Доливо-Добровольським (1889 р.) обладнання для трифазного струму – трансформатора, генератора та, нарешті, самого простого у конструктивному відношенні та надійного в експлуатації трифазного асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором.

Електрична енергія на шляху від генератора до споживача трансформується мінімум 3–4 рази, таким чином питома вага трансформаторного обладнання у електроенергетиці досить велика.

Удосконалення ЕМ велося із збереженням двох основних тенденцій – зниження витрат матеріалів на одиницю потужності та підвищення надійності ЕМ.

На рис. 3.1 наведена класифікація ЕМ за родом струму та конструктивним виконанням.

Основні закони електромеханіки

Основу роботи будь-якої ЕМ складають три закони електродинаміки: – закон електромагнітної індукції; – закон електромагнітних сил; – закон повного струму.

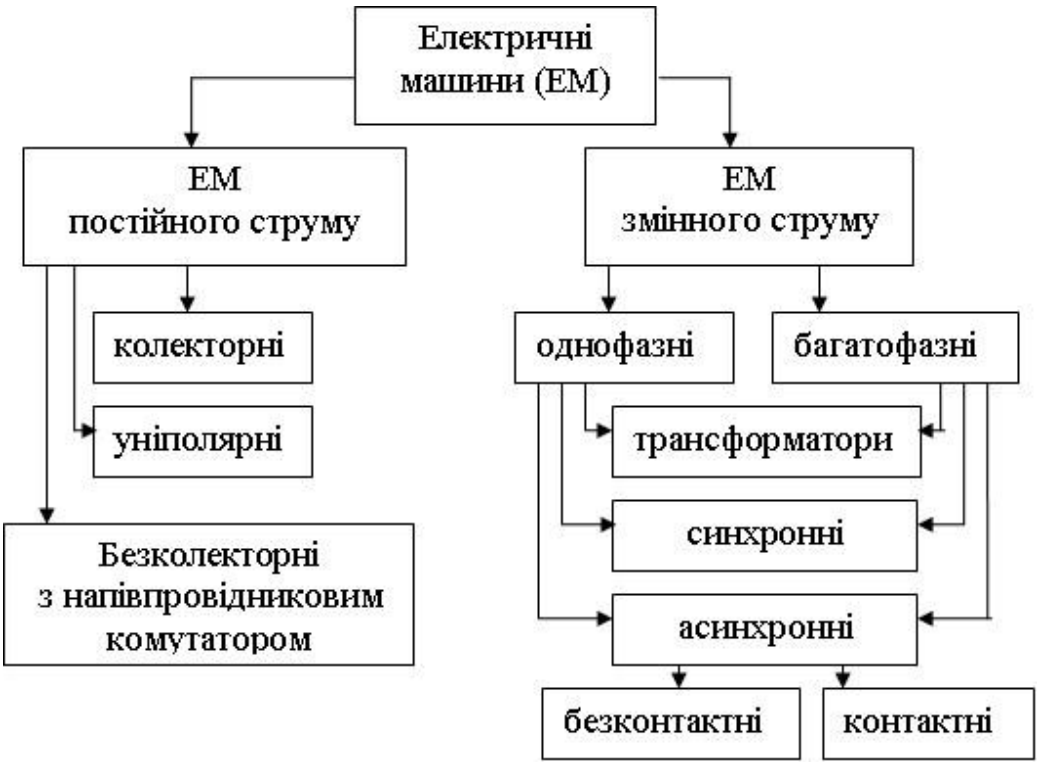
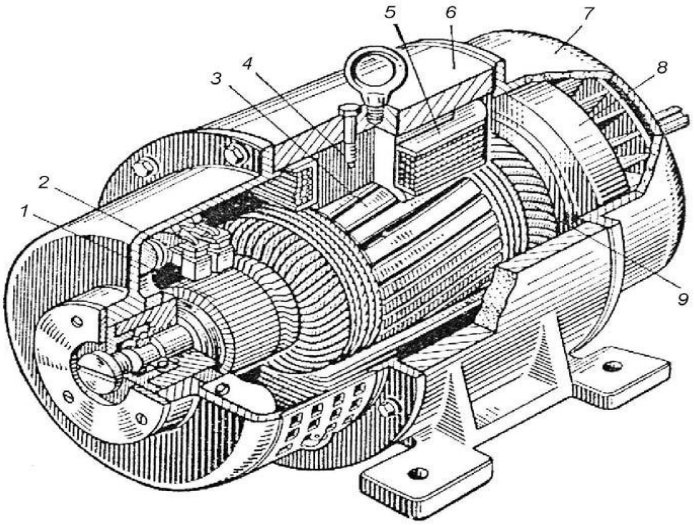


Рисунок 3.1 - Класифікація ЕМ за родом струму та конструктивним виконанням

Устрій машини постійного струму

Елементи конструкції машин постійного струму

Незважаючи на деякі відмінності у конструкції окремих складальних одиниць та деталей, будова всіх машин постійного струму (МПС) однакова. Основний тип МПС – колекторна машина, особливістю якої є наявність колектора на валу машини. Електрична МПС складається (рис. 3.2) зі статора, якоря, колектора, щіткового апарата та підшипникових щитів.



1 – колектор; 2 – щітка; 3 – осердя якоря; 4 – головний полюс; 5 – котушка обмотки збудження; 6 – станина (корпус); 7 – підшипниковий щит; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

Рисунок. 3.2 - Будова машини постійного струму

Станина (рис. 3.2) використовується для кріплення полюсів та підшипникових щитів і є частиною магнітного кола, оскільки по ній замикається магнітний потік машини.

Тому станину виконують із сталі – матеріалу, що має достатню механічну міцність та велику магнітну проникність. Станина МПС великої потужності може виконуватися рознімною. Для машин малих потужностей станиною може бути відрізок труби.

Головні полюси (рис. 3.3) виконуються шихтованими із сталевих штампованих листів листової сталі завтовшки 1÷2 *мм* або з електротехнічної сталі.

а) б)

Рисунок. 3.3 - Головні полюси

Сталеві листи спресовані та скріплені заклепками (4), головки яких втоплені у натискні щоки (1), встановлені на торцях полюса. Полюси кріплять до станини болтами (3): нарізку різьби під болти виконують безпосередньо у осерді полюсів (рис. 3.3,а), або в сталевих стержнях (6), вставлених у отвори, які виштамповані у листах полюсів (рис. 3.3,б). Магнітне поле у МПС створюється намагнічуючою силою обмотки збудження (рис. 3.4,а), що виконується у вигляді полюсних котушок 2, розташованих на осерді 1 полюсів. Кількість котушок збудження визначається за способом збудження машини.

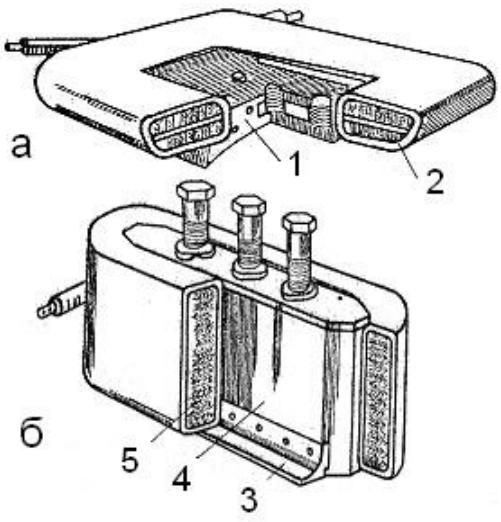


Рисунок 3.4 - Обмотка збудження (а) та додатковий полюс (б).

У машинах великої потужності (більше ніж 100 *кВт*) та у МПС, призначених для роботи з різко змінним навантаженням, на полюсних наконечниках штампують пази, у які вкладається компенсаційна обмотка, що вмикається послідовно до якірного кола.

Додаткові полюси (рис. 3.4,б) застосовуються для зменшення іскріння під щітками, попереджаючи таким чином «підгоряння» колектора та утворення на його поверхні «кругового вогню». Виконуються, як правило, суцільними із сталі, містяться посередині між головними полюсами та кріпляться до станини болтами. Конфігурація додаткового полюса 4 і способи кріплення обмотки 3 залежать від потужності машини.

Якщо додатковий полюс виконується шихтованим, то технологія його збирання відповідає технології головних полюсів. На полюсі розташовується обмотка 5 додаткових полюсів, що вмикається послідовно з обмоткою якоря. Обмотки головних (рис. 3.4,а) та додаткових (рис. 3.4,б) полюсів виконуються з мідного проводу. Конструкція обмоток, тип проводу (круглий, прямокутний) залежить від потужності машини та способу збудження.

Якір МПС (рис. 3.5) складається з валу, осердя і колектора. Пакет якоря набирається із штампованих листів електротехнічної сталі (рис. 3.6).

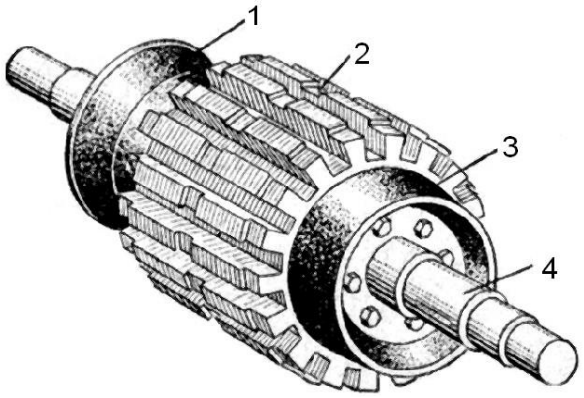


Рисунок 3.5 - Осердя якоря: 1, 3 – обмоткотримач; 2 – бандажні канавки; 4 – вал

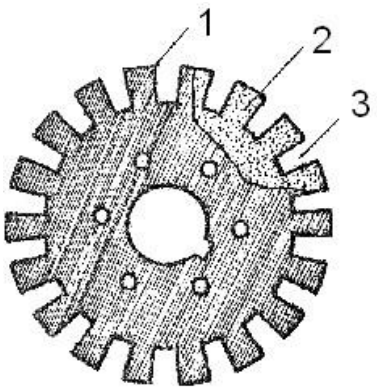


Рисунок 3.6 - Лист якоря: 1 – зубець; 2 – ізоляція; 3 – паз

Застосовується холоднокатана ізотропна сталь марок 2013, 2312 та інших завтовшки 0,5 (0,35) *мм*, якість якої не залежить від напрямку прокату. На зовнішній поверхні листів штампуються пази 3 для укладки обмотки якоря, форма яких визначається потужністю машини. Листи осердя ізолюються з двох боків тонкою плівкою лаку 2, або оксидною плівкою. Зібрані у загальний пакет листи насаджують на вал і закріплюють на ньому за допомогою натискних шайб.

Шихтована конструкція пакета якоря дозволяє зменшити втрати енергії від вихрових струмів, що виникають при обертанні якоря у магнітному полі. Для поліпшення охолодження у осерді якоря можуть виконуватися аксіальні вентиляційні канали. У машинах великої потужності, при

довжині якоря більшій, ніж 35 *см*, осердя набирається з окремих сталевих пакетів завтовшки 4÷6 *см* із влаштуванням між ними радіальних каналів заширшки 1*см*.

Колектор МПТ (рис. 3.7, 3.8) збирається з клиноподібних пластин 4 холоднокатаної (колекторної) міді, ізольованих одна від одної прокладками з колекторного міканіту 3.

За способом кріплення пластин та ізоляції розрізнюють колектори зі сталевим конусом і втулкою (рис. 3.7) та колектори на пластмасі (рис. 3.8).

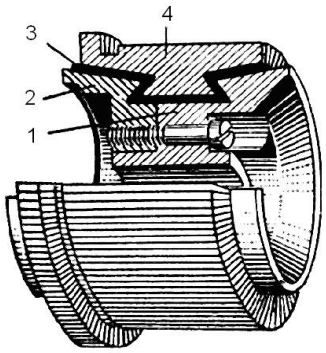


Рисунок 3.7 - Колектор з сталевим конусом

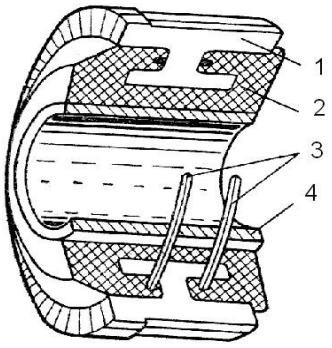


Рисунок 3.8 - Колектор на пластмасі

При арочному способі кріплення сталевим конусом зусилля передається від корпусу 1 та натискного фланця 2 на внутрішню поверхню ластівчиного хвоста колекторних пластин, тому при ослабленні тиску між пластинами їх можна підпресувати.

Обмотка якоря виконується з мідного проводу круглого або прямокутного перетину і складається з окремих секцій, кінці яких припаюються до шпульок колектору. Обмотка виконується двошаровою. Одна сторона секції (називається пряма) розміщена у верхньому шарі, друга (зворотна) – у нижньому. Між шарами встановлюють додаткову (міжшарову) ізоляцію. Крім того, в паз вкладається корпусна ізоляція, що ізолює обмотку від сталі якоря та запобігає механічним ушкодженням обмотки. Для закріплення обмотки у пазах використовують клини (дерев'яні, гетинаксові, текстолітові) або бандажі зі склострічки або сталевого дроту (у машинах великої потужності). Крім того лобові частини обмотки кріплять бандажами до обмоткотримача (рис. 3.5).

Щітковий апарат (рис. 3.9,а) складається з траверси, щіткових пальців (болтів) та щіткотримачів (рис. 3.9,б).

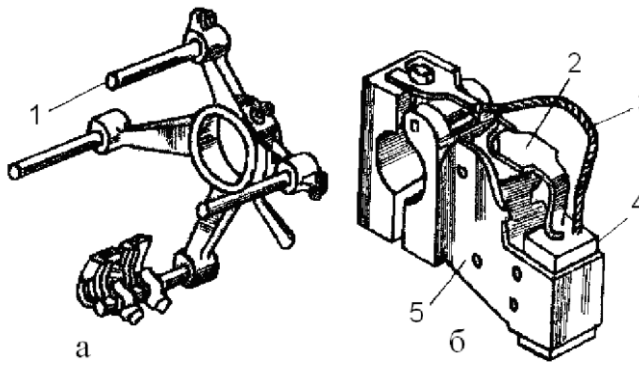


Рисунок 3.9 - Щітковий апарат

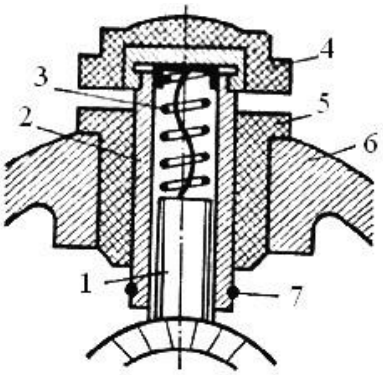


Рисунок 3.10 - Щіткотримач машин малої потужності

Траверса використовується для кріплення на її щіткових пальцях 1 щіткотримачів. Траверса кріпиться до підшипникового щиту. Для точного настроювання комутації (фіксації щіток у певному положенні) траверса допускає поворот. Щіткотримач (рис. 3.9,б) складається з обойми 5 і натискного приладу 2, що забезпечує примикання щітки до колектору із певним зусиллям. Щіткотримач машин малої потужності (рис. 3.10) розташовується у підшипниковому щиті 6 і містить щітку 1, обойму 2, пружину 3, ковпак 4, ізоляційну втулку 5, затискач для вивідного провідника 7.

Щітка (рис. 3.11) являє собою прямокутний брусок 1, виконаний на основі графіту (графітні, мідно-графітні).

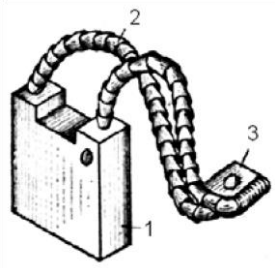


Рисунок 3.11 - Щітка машини постійного струму

Щітка характеризується величиною щільності струму під нею і падінням напруги у щітковому контакті. Щітка споряджена гнучким мідним канатиком 2, один кінець якого армірований у щітку, а другий спорядженний наконечником 3 для приєднання до щіткового апарата. Натиснення (0,02÷0,04 *мПа*) повинно бути відрегульовано для всіх щіток.

Підшипникові щити (див. рис. 1.5) є з'єднувальними деталями між станиною і якорем, а також опорною конструкцією для якоря, вал якого обертається в підшипниках, встановлених у щитах. Конструкція підшипникових щитів визначається потужністю машини, умовою її кріплення на місці експлуатації.

Загальні питання машин змінного струму

Машини змінного струму підрозділяються на три основні види: асинхронні, синхронні та колекторні. Конструктивно як ті, так і інші машини

мають нерухому частину, що зветься статором, та обертову частину, що зветься ротором. Звичайно ротор розташовується всередині статора.

В основі роботи електричних машин змінного струму лежить принцип обертового магнітного поля, частота обертання n_1 якого визначається частотою мережі f_1 та числом пар полюсів обмотки статора p, об/хв:

$$\boldsymbol{n_1 = \frac{60 f_1}{p}}$$

Асинхронною називають таку електричну машину, частота обертання ротора n якої відрізняється від частоти обертання магнітного поля n_1 та змінюється залежно від навантажувального моменту.

Синхронною називають таку електричну машину змінного струму, частота обертання ротора якої при будь-якому режимі роботи дорівнює частоті обертання магнітного поля $n = n_1 1$.

Асинхронні та синхронні машини розрізняються за принципом дії, будовою їхніх роторів, але статори цих машин мають практично однакову конструкцію. Будови обмоток статора, створення МРС, наведення в обмотках ЕРС обертовим магнітним полем є спільними як для асинхронних, так і для синхронних машин.

Конструкція та принцип дії АМ

Асинхронною називається двообмоткова електрична машина змінного струму, у котрій одна обмотка (первинна) одержує живлення від електричної мережі з постійною частотою f_1, а вторинна замикається накоротко або на електричний опір.

На долю асинхронних двигунів (АД) припадає до 90% усіх електродвигунів, що випускаються. Широке їхнє поширення обумовлено простотою конструкції, надійністю в роботі, добрими експлуатаційними властивостями, невисокою вартістю та простотою обслуговування. Галузі застосування АД досить широкі – від побутових електроприладів до великих верстатів і агрегатів, підйомних пристроїв, транспортних засобів і т. п. Відповідно до цього одинична потужність АД становить від часток вата до тисяч кіловат.

Широкому використанню АД в сучасному електроприводі сприяє розробка електронних устроїв, що дозволяють розширити регулювальні властивості двигунів.

До недоліків АД слід віднести споживання з мережі реактивного струму, необхідного для створення магнітного потоку.

АД мають відносно високі ККД і $cos\varphi$. При потужностях більш за 1*кВт*: $\eta = 0{,}7 \div 0{,}95$, $cos\varphi = 0{,}7 \div 0{,}9$.

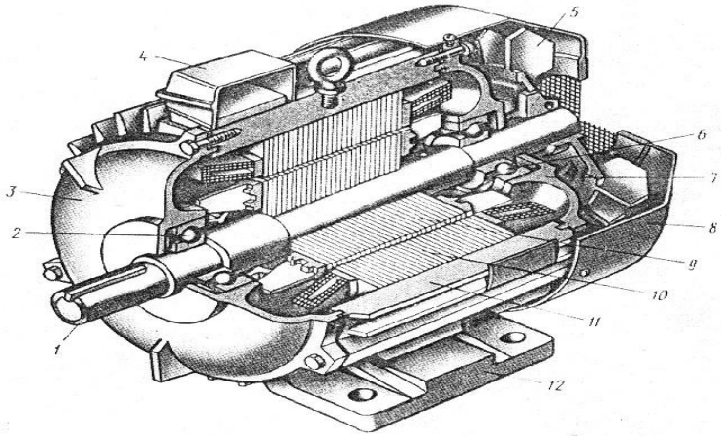
Трифазні, двофазні, однофазні АД випускаються таких модифікацій:

- з підвищеним пусковим моментом;

- з підвищеним ковзанням;
- багатошвидкісні двигуни;
- на частоту 50/60 *Гц*;
- малошумні;
- вбудовані;
- з вмонтованим температурним захистом;
- для роботи від тиристорних перетворювачів;
- тропічного, волого-морозостійкого виконання; • стійкого до хімічно агресивних середовищ; • вибухозахищеного виконання.

Конструкція АД

Існують два основних типи асинхронних двигунів: двигуни з короткозамкненим ротором (рис. 3.12) та двигуни з контактними кільцями з фазним ротором (рис. 3.18). Основні частини АД: нерухома частина – статор і рухлива частина – ротор, розділені повітряним зазором $\delta = 0{,}1\,\text{мм}$ у двигунах малої потужності й $\delta = 1 \div 1{,}5\,\text{мм}$ у двигунах великої потужності.



1 – вал; 2, 6 – підшипники; 3, 7 – підшипникові щити; 4 – коробка виводів; 5 – вентилятор; 8 – кожух вентилятора; 9 – осердя ротора з короткозамкненою обмоткою; 10 – осердя статора з обмоткою; 11– корпус; 12 – лапи

Рисунок 3.12 - Двигун із короткозамкненим ротором

Обидва типи двигунів мають однакову конструкцію статора і розрізняються за будовою ротора. Асинхронний двигун складається зі станини (корпусу), що повинен мати достатню механічну міцність, та виконується з чавуну або алюмінію. За допомогою лап двигун кріпиться до фундаменту або до елементів виробничого механізму. Існують також інші засоби кріплення двигуна до виробничого механізму.

Вал двигуна обертається в підшипниках кочення. Підшипники із зовнішньої та внутрішньої сторін закриті кришками.

Конструкція оболонки (корпус, щити та ін.) залежить від виконання машини за ступенем захищеності та від системи охолодження.

Для поліпшення охолодження двигуна на його валу укріплений відцентровий вентилятор, що обдуває ребристий корпус машини (рис. 3.12). Вентилятор закритий кожухом.

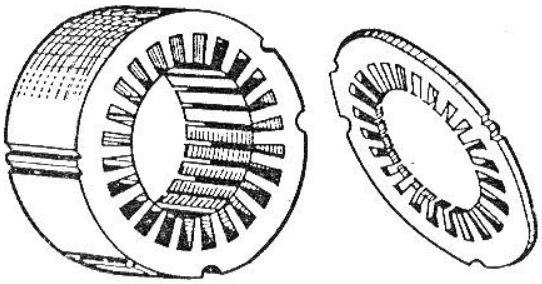


Рисунок 3.13 - Осердя статора та штампований лист

У внутрішній розточці станини кріпиться осердя статора (рис. 3.13), скріплене скобами та запресоване у станину. Положення осердя фіксується штифтами, що перешкоджають його зсуву в аксіальному напрямку.

Для зменшення магнітних втрат осердя статора збирають з окремих, ізольованих термостійким покриттям листів (завтовшки 0,5 або 0,35 мм) електротехнічної сталі (рис. 3.13). Для осердя АД застосовують холоднокатані ізотропні електротехнічні сталі марок 2013, 2312, 2411 та ін.

У пази магнітопроводу статора укладається обмотка з ізольованого мідного проводу круглого або прямокутного перетину. Обмотку з круглого проводу вкладають (усипають) у напівзакриті пази через шліц у пазу (рис. 3.14).

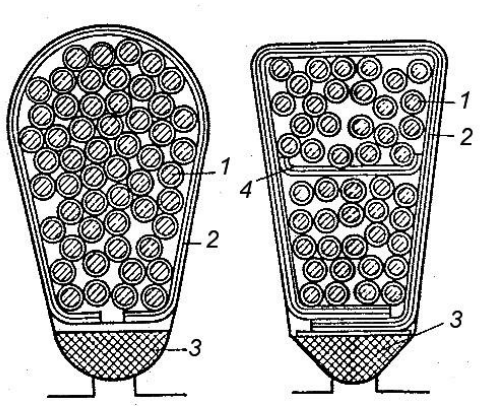
Обмотки з прямокутного проводу виготовляють у вигляді жорстких секцій та вкладають у відкриті (рис. 3.15 ,а) або напіввідкриті (рис. 3.15 ,б) пази.

У сучасних АД використовують електроізоляційні матеріали класів нагрівостійкості *B* та *F*, а для спеціальних машин, що працюють у важких умовах, – класу *H.* У машинах розрізняють міжвиткову та корпусну ізоляції*.*

Міжвиткова ізоляція (між витками обмотки) забезпечується ізоляцією самого провідника, яка наноситься на нього в процесі виготовлення.

Корпусна ізоляція відокремлює провідники обмотки від корпусу електричної машини. Для неї використовують різноманітні прокладки, гільзи або ряд прошарків ізоляції.

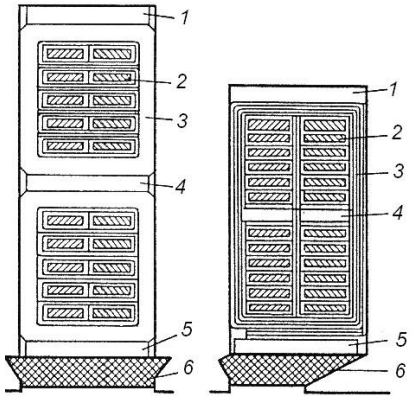
Трифазна обмотка статора може бути з'єднана за схемою «зірка» – (Y) або «трикутник» – (Δ). Початки фаз обмоток на схемах позначаються буквами С1, С2, С3, кінці С4, С5, С6.



а *б*

1 – провідник; 2 – корпусна ізоляція; 3 – клин; 4 – міжшарова прокладка

Рисунок 3.14 - Пази статора для всипних одношарової –а та двошарової – б обмоток



а *б*

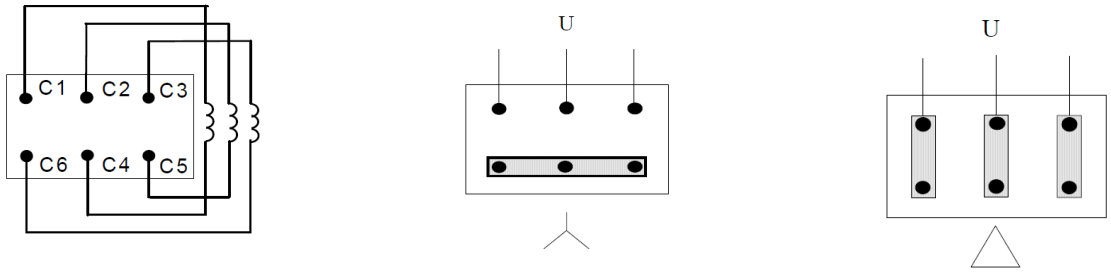
1,4,5 – ізоляційні прокладки; 2 – провідник; 3 – корпусна ізоляція котушки; 6 – клин

Рисунок 3.15 - Відкритий – а і напіввідкритий – б пази статора для обмоток із жорстких секцій

Для зручності приєднання кінців обмотки статора до електричної мережі коробка виводів із затискачами розташована поверх станини та закріплена на ній болтами. Коробка виводів герметизована прокладками. До кожного затискача коробки підімкнений відповідний вивід обмотки статора. Для затискачів прийняті позначення, що відповідають виводам обмотки статора.

Виводи обмоток фаз розташовуються на панелі таким чином, щоб з'єднання обмоток фаз було зручно виконувати за допомогою перемичок, без перехрещування останніх (рис. 3.16 ,а).

Вмикання обмотки в зірку й трикутник за допомогою перемичок показано на рис. 3.16 ,б та 3.16 ,в.



а б в

Рисунок 3.16 - Клемна панель коробки виводів

Обмотки двигунів малої та середньої потужностей виготовляють, наприклад, на напругу 220/127 *В*, 380/220 *В*. Напруга, зазначена у чисельнику, відповідає з'єднанню обмоток зіркою, у знаменнику –

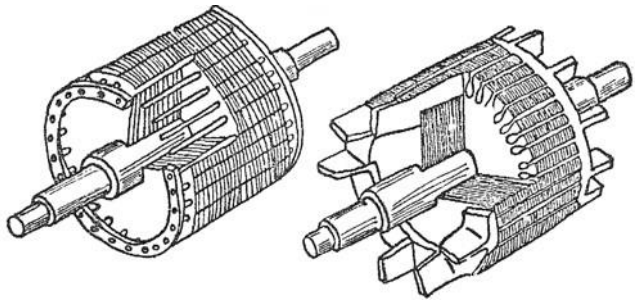
трикутником. У двигунах із фазним ротором є ще виводи обмотки ротора, з'єднані у зірку, – Р1, Р2, Р3.

Осердя (пакет) ротора збирають із листів електротехнічної сталі, що штампують разом із листами статора. У двигунах із короткозамкненим ротором (рис. 3.17) застосовують напівзакриті або закриті пази, що мають овальну або фігурну форми.

Обмотку ротора виконують шляхом заливки в пази під тиском алюмінієвого сплаву. Одночасно відливаються торцеві замкнуті кільця та вентиляційні лопатки (рис. 3.17 ,б).

У більш великих та спеціальних машинах у пази ротора вставляються мідні (бронзові, латунні) стержні, до яких приварюються мідні кільця, що замкнені накоротко (рис. 3.17 ,а).

Пакет з алюмінієвою кліткою напресовується на вал.

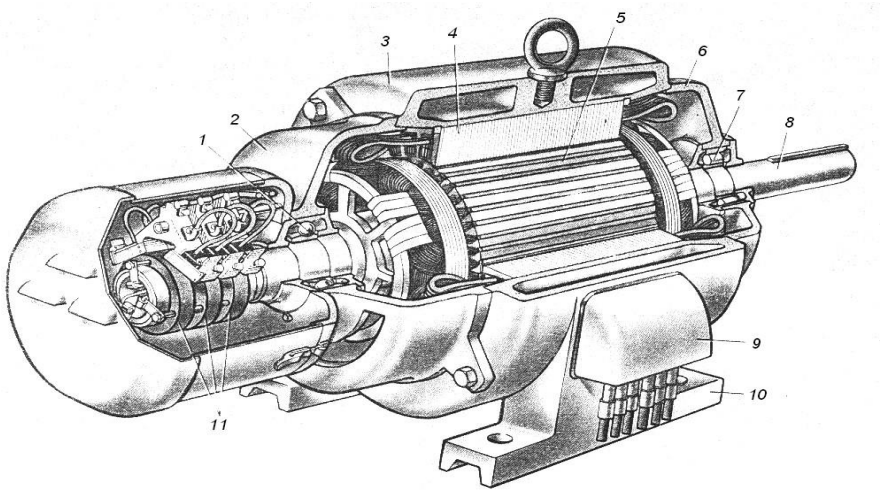


а б

Рисунок 3.17 - Короткозамкнені ротори АД

Таким чином, короткозамкнена обмотка ротора являє собою клітку на зразок білячої. В електричному відношенні вона є багатофазною обмоткою з числом фаз, що дорівнює числу стержнів.

Двигун з фазним ротором (рис. 3.18).



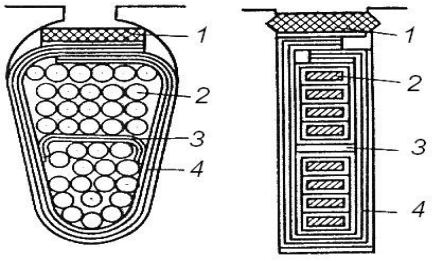
1, 7 – підшипники; 2, 6 – підшипникові щити; 3 – корпус;4 – осердя статора з обмоткою; 5 – осердя ротора; 8 – вал; 9 – коробка виводів; 10 – лапи; 11 – контактні кільця

Рисунок 3.18 - Асинхронний двигун із фазним ротором

Контактні кільця розташовані поза оболонкою машини, вивідні кінці обмотки ротора проходять через отвір у валу та підмикаються до контактних кілець болтами. Щіткотримачі зі щітками прикріплюються щітковою траверсою до щита. Кільця ізольовані один від одного та від вала машини, і до них через нерухомі щітки підмикають пусковий або регулювальний реостат.

Для фазних роторів застосовують пази овальної форми (рис. 3.19 ,а), куди вкладають обмотку з круглого проводу або пази прямокутної форми (рис. 3.19 ,б), куди вкладають обмотку, що складається з жорстких секцій. В АД із фазним ротором у пази укладається трифазна обмотка аналогічно обмотці статора. Лобові частини роторної обмотки спираються на ізольовані металеві кільця (рис. 3.18) та за допомогою бандажів із склострічки утримуються від деформуючих впливів, викликаних відцентровими силами.

Для здійснення електричного контакту з обмоткою обертового ротора на кожне контактне кільце 1 (рис. 3.20) накладають звичайно дві щітки 2, що розташовуються у щіткотримачах 3, які мають пружини, що забезпечують притиснення щіток до контактних кілець з певним зусиллям.



а б

Рисунок 3.19 - Пази фазного ротора

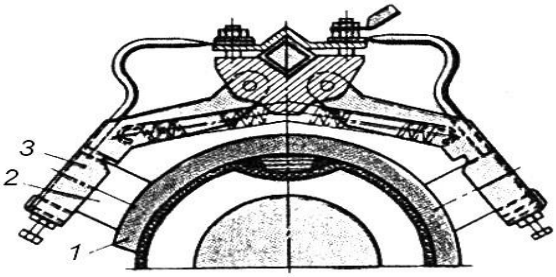


Рисунок 3.20 - Щіткотримач

Асинхронні двигуни з фазним ротором мають більш складну конструкцію та менш надійні, але вони мають кращі регулювальні і пускові властивості, ніж двигуни з короткозамкненим ротором.

Відповідно до принципу оборотності електричних машин асинхронні машини можуть працювати в режимі двигуна, електромагнітного гальма і генератора.

Синхронні машини

Режими роботи синхронної машини

В асинхронних машинах струм в обмотці ротора виникає завдяки ковзанню ротора в магнітному полі. Унаслідок цього частота струму ротора f_2 залежить від швидкості обертання ротора і, отже, від навантаження АМ.

Якщо на обмотку ротора подати напругу U_2заданої частоти f_2, то частота струму в обмотці ротора тим самим буде задана. Але якщо

частоти в колах обмоток статора та ротора задані, то ковзання машини і, отже, частота обертання ротора n виходять цілком визначеними і не залежними від навантаження машини

$$n = n_1 - n_s = \frac{60f_1}{p} - \frac{60f_2}{p} = \frac{60(f_1 - f_2)}{p}.$$

Таку машину змінного струму, частота обертання якої знаходиться у строгій відповідності із частотою мережі, називають синхронною.

Переважне поширення одержали синхронні машини, в яких на обмотку ротора подається постійна напруга з $f_2 = 0$. При цьому частота обертання ротора машини дорівнює частоті обертання магнітного поля статора

$$n = n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

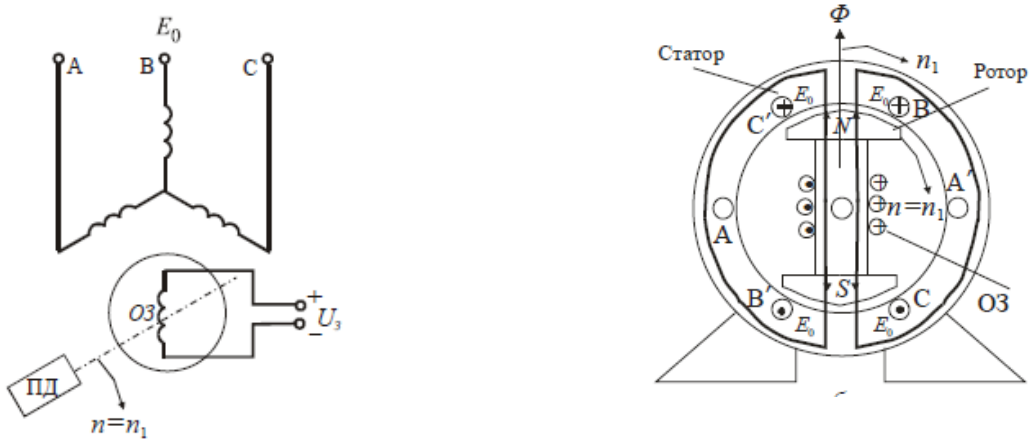
Оскільки ротор синхронної машини n обертається із синхронною частотою n_1 поля в зазорі, то в обмотці ротора не індукується ЕРС. Величина постійного струму в обмотці ротора визначається тільки підведеною ззовні до обмотки напругою та її активним опором.

Обмотка, в якій тече постійний струм, називається обмоткою збудження (ОЗ), тому що вона збуджує в машині магнітне поле незалежно від режиму роботи.

Електричне з'єднання обмотки збудження із зовнішнім джерелом (збудником) здійснюється за допомогою пристрою, що складається з двох контактних кілець, до яких приєднується обмотка, і щіток, що ковзають по поверхні кілець та з'єднані із зовнішнім джерелом.

Обмотка статора повинна мати таке ж число полюсів, що і ротор.

У пазах статора синхронної машини розташовують симетричну трифазну обмотку. На рис. 3.21 ,а представлена електрична схема синхронного генератора.



а б

Рисунок 3.21 - Електрична схема синхронного генератора −а та напрямки ЕРС в обмотці статора −б

Первинний двигун (ПД) обертає ротор з обмоткою збудження. На обмотку збудження подають напругу від джерела постійного струму. Збуджений ротор синхронної машини приводиться в обертання зі швидкістю n_1.

Обертове поле збудження наводить в обмотці статора змінну ЕРС із частотою

$$f_1 = \frac{pn_1}{60}$$

Напрямок індукованої полем збудження ЕРС E_0 визначається за правилом правої руки і позначений на рис. 3.21 ,б знаком «**+**» у верхній частині провідників обмотки статора та знаком «●» у нижній частині. При цьому враховано відносне переміщення провідників обмотки статора відносно обертового двополюсного поля збудження – поле рухається вправо, провідники – вліво.

Якщо обмотку статора підключити до якого-небудь навантаження, то трифазний струм, що протікає по цій обмотці, створює обертове магнітне поле, перша гармоніка якого обертається в тому ж напрямку і з тією же частотою n_1, що і ротор.

Результуючий магнітний потік *Ф* синхронної машини створюється спільною дією МРС обмотки збудження та МРС обмотки статора, і *результуюче магнітне поле обертається в просторі з тією же частотою, що і ротор*.

У синхронній машині обмотку, в якій індукується ЕРС та проходить струм навантаження, називають *обмоткою якоря* (*статора*), а частина машини, на якій розташована обмотка збудження, – *індуктором*. Таким чином, у приведеної СМ статор є якорем, а ротор – індуктором.

Синхронна машина може працювати автономно як генератор на автономне, підімкнене до неї *навантаження, чи паралельно з мережею*, до якої підімкнені інші генератори.

При роботі паралельно з мережею вона може віддавати або споживати електричну енергію, тобто працювати генератором або двигуном.

У режимі двигуна вісь поля ротора відстає від осі поля статора на кут Θ. У режимі двигуна поле статора є ведучим.

Синхронні двигуни (СД) застосовуються головним чином для привода пристроїв великої потужності у великих енергетичних установках.

СД використовують як компенсатори – генератори реактивної потужності, що дають можливість підвищити коефіцієнт потужності мережі. Синхронні генератори (СГ) складають основу електротехнічного устаткування електростанцій, тобто практично вся електрична енергія виробляється СГ.

Типи синхронних машин та їх будова.

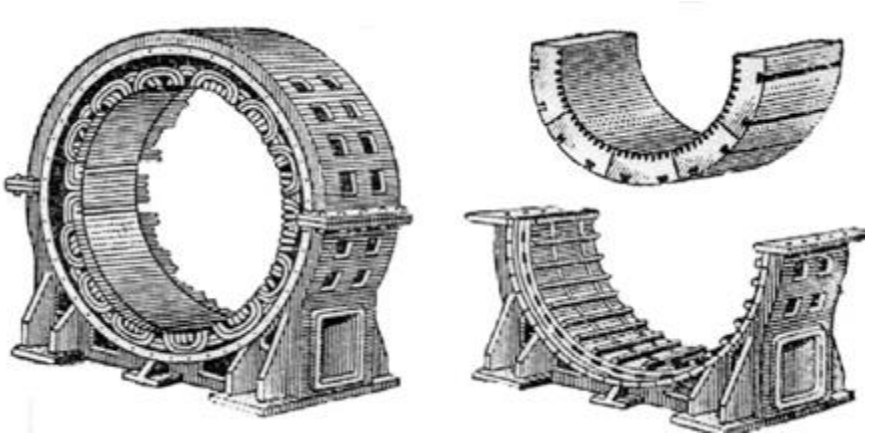
Синхронна машина складається з нерухомої частини – статора (якоря) і обертової частини – ротора.

Конструкція синхронних машин, і в першу чергу конструкція ротора, обумовлюється частотою обертання. При $n < 1500\text{об/хв}(p > 2)$, тобто в гідрогенераторах, синхронних компенсаторах і в тихохідних двигунах, застосовується явнополюсне виконання ротора.

Синхронні машини з неявнополюсним ротором – турбогенератори − виготовляються з частотою обертання 3000 об/хв у двополюсному виконанні (p=1) та 1500 об/хв у чотириполюсному виконанні (p=2).

Явнополюсні синхронні машини

Конструкція статора СМ нічим не відрізняється від конструкції статора АМ (рис. 3.22). Осердя статора являє собою порожній циліндр, набраний з окремих листів електротехнічної сталі.



а б

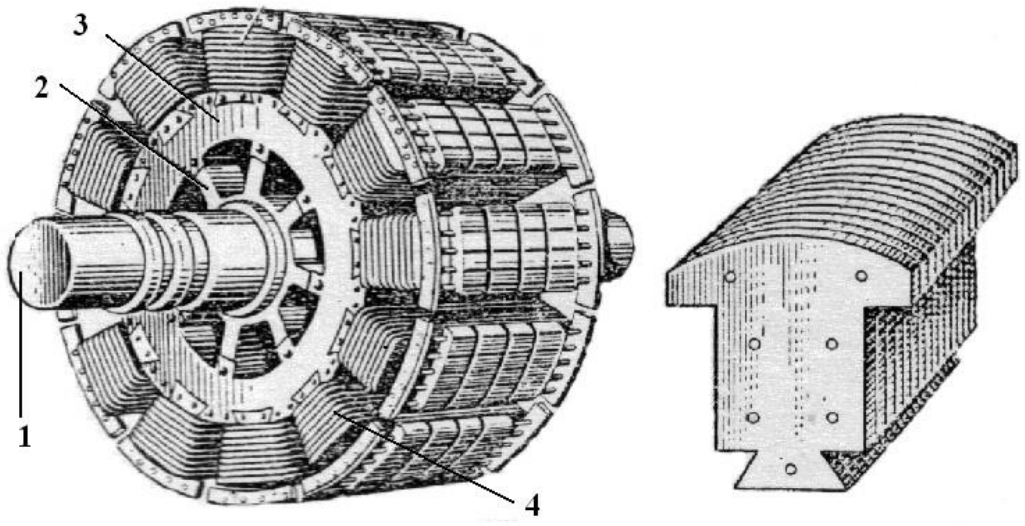
а – у зібраному вигляді; б – частина осердя; в – частина

Рисунок 3.22 - Статор синхронної машини: станини

При зовнішньому діаметрі статора менше ніж 900 *мм* його збирають з цільних кільцевих пластин, а при більшому діаметрі – з окремих пластин, називаних сегментами. Пази осердя статора мають прямокутний перетин. У них укладають двошарові обмотки. Корпуси статорів СМ великої потужності роблять рознімними для зручності транспортування та збірки.

Ротори багатополюсних синхронних машин мають явнополюсну будову (рис. 3.23). Кожен полюс виконується у вигляді окремого вузла, що складається із осердя, полюсного наконечника та котушки збудження.

Обмотку збудження у великих машинах для кращого охолодження виконують з неізольованих мідних шин великого перетину, намотаних на ребро. Між сусідніми витками укладають ізоляційні прокладки. Котушку запікають і встановлюють на полюсі, на якому по периметру попередньо наносять корпусну ізоляцію. У машинах невеликої потужності котушки обмотки збудження виконують з ізольованих провідників прямокутного чи круглого перетину.



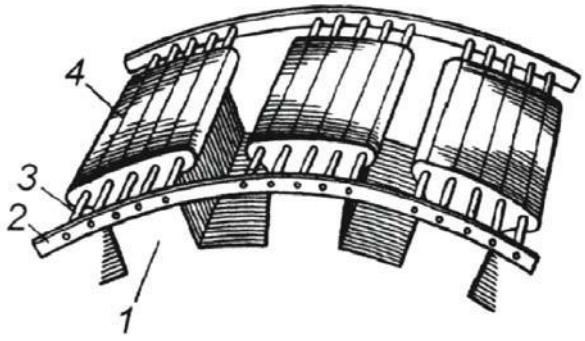
а б

а – загальний вигляд; 1 – вал; 2 – роторна зірка; 3 – обід; 4 – обмотка збудження;б – осердя полюса

Рисунок 3.23 - Ротор явнополюсної синхронної машини.

Полюси кріпляться до ободу (3) ротора (рис. 3.23 ,а). Обід ротора є ярмом, по якому замикаються потоки полюсів. Полюси кріпляться до обода за допомогою хвостів, які мають форму ластівчиного хвоста (рис. 3.23 ,*б)* чи Т-подібну форму.

У пазах (4) полюсних наконечників (1) розташовується стержнева демпферна обмотка (3) (рис. 3.24). Стержні обмотки виготовляють з міді чи латуні. По торцях стержні замикають пластинами чи кільцями так, щоб утворилася короткозамкнена клітка (2).



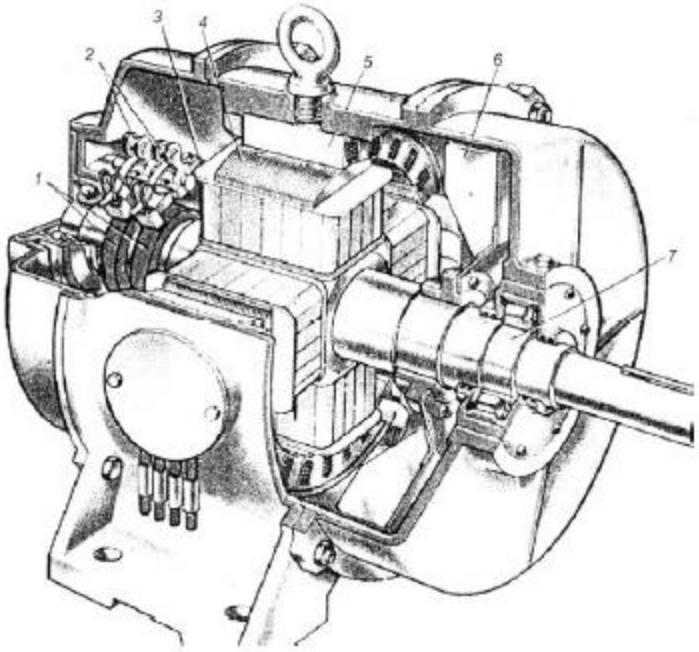
1 – полюс; 2 – короткозамкнене кільце; 3 – демпферна обмотка; 4 – пази

Рисунок 3.24 - Демпферна обмотка.

Демпферна обмотка виконує ряд функцій. У генераторах вона послабляє вплив несиметричного навантаження і знижує амплітуду коливань ротора. У двигунах вона є пусковою обмоткою і також знижує амплітуду коливань ротора при пульсації навантаження.

Нормальною для явнополюсних синхронних машин є будова з горизонтальним валом.

Таку будову мають переважна частина синхронних двигунів, синхронні компенсатори і генератори, призначені для з'єднання з двигунами внутрішнього згоряння (дизель-генератори). Дизель-генератори мають частоту обертання від 600 до 1500 об/хв.



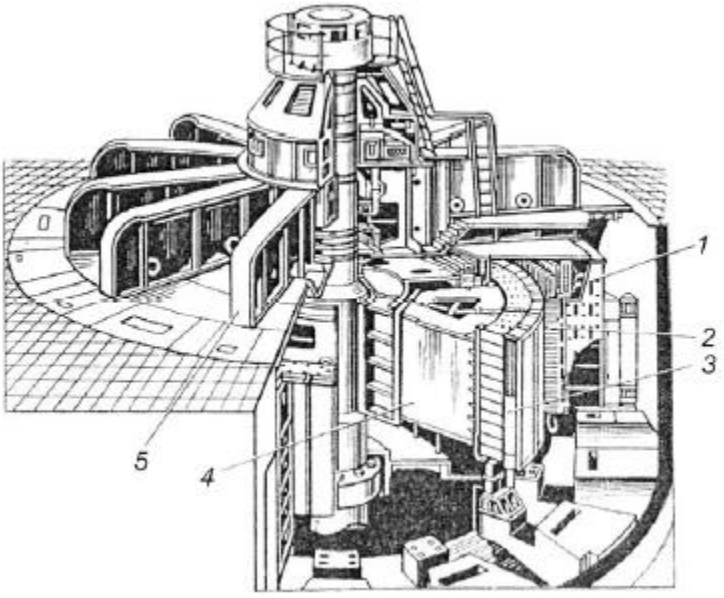
1 – контактне кільце; 2 – щіткотримач; 3 – полюсна котушка; 4 – полюсний наконечник; 5 – осердя статора; 6 – вентилятор; 7 – вал
Рисунок 3.25 - Дизель-генератор:

Між зовнішньою поверхнею полюсного наконечника і внутрішньою поверхнею осердя статора є повітряний зазор δ. По осі полюса цей зазор мінімальний, а на краях має максимальне значення δ_{max} (рис. 3.25). Така конфігурація полюсного наконечника необхідна для синусоїдального розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі.

Великі гідрогенератори звичайно виконуються з вертикальним розташуванням вала (рис. 3.26). Приводним двигуном при цьому є гідравлічна турбіна. Гідравлічна турбіна розвиває невелику частоту обертання.

Для того щоб при таких частотах обертання одержати змінну напругу частотою 50 *Гц*, гідрогенератор повинен мати велике число полюсів.

Самі потужні гідрогенератори в даний час побудовані мають потужність 715 *МВА* при частоті обертання 143 *об/хв* . Зовнішній діаметр гідрогенераторів складає близько 15 *м*, діаметр його ротора – близько 12 *м*, довжина магнітопровода статора 2,75 *м*, число полюсів 2*p* = 2.

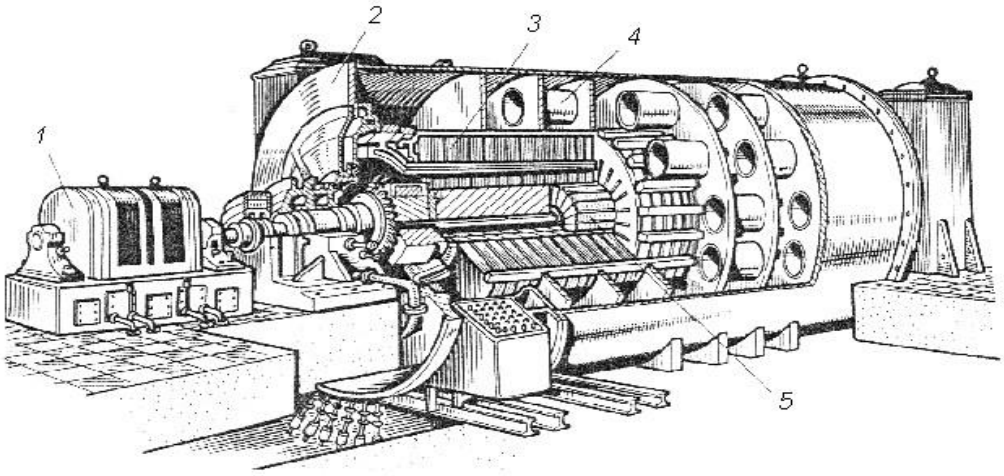


1 – корпус статора; 2 – осердя статора; 3 – полюси ротора;
4 – обід ротора; 5 – хрестовина
Рисунок. 3.26 - Гідрогенератор.

Неявнополюсні синхронні машини

Синхронні генератори, що приводяться в обертання швидкохідними паровими турбінами, називають турбогенераторами (рис. 3.27).

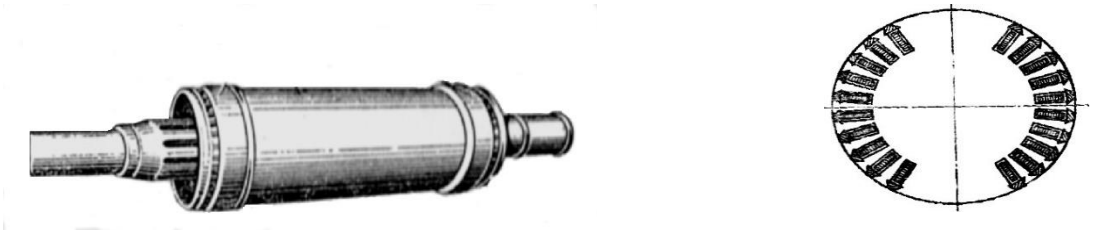
Технічні показники парової турбіни зі збільшенням частоти обертання поліпшуються. Тому турбогенератори звичайно виконуються двополюсними.



1 – збудник; 2 – корпус; 3 – осердя статора; 4 – секції водневого охолодження; 5 – ротор
Рисунок 3.27 - Турбогенератор:

З метою одержання великої механічної міцності ротор турбогенераторів виконується неявнополюсним. При такому виконанні величина повітряного зазора однакова по всьому колу статора. Ротор виточується з цільної сталевої заготівки та має вигляд масивного циліндра (рис. 3.28 ,а).

У роторі фрезерують пази (рис. 3.28 ,б) для розміщення в них витків обмотки збудження. Приблизно третя частина полюсного ділення залишається вільною від пазів і утворюється так називаний великий зуб, через який проходить головна частина магнітного потоку полюсів.



а б

Рисунок 3.28 - Загальний вигляд ротора турбогенератора –а та поперечний розріз ротора –б

Обмотку збудження, покладену у вигляді концентричних котушок у пази ротора, кріплять за допомогою клинів. Клини виконують з немагнітної сталі для ослаблення магнітного потоку розсіювання паза. Лобові частини обмотки збудження закривають бандажними кільцями, виконаними з немагнітної сталі.

Крім турбогенераторів з неявнополюсним ротором, випускають швидкохідні синхронні двигуни великої потужності – турбодвигуни.

Причини відмов, методи діагностики та ремонту.

Двигни постійного струму:

– Іскріння щіток:

Іскріння супроводжується підвищеним нагріванням колектора та щіток.

А) Щітки встановлені неправильно .

Перевірити положення щіток за заводськими мітками, що є на траверсі.

Б) Відстань по колу колектора між щітками окремих бракетів нерівномірна .

Перевірити положення щіток на колекторі за допомогою паперової стрічки та встановити бракети так, щоб щітки сусідніх бракетів знаходилися на однаковій відстані по колу колектора. Не можна встановлювати щітки, відраховуючи певну кількість колекторних пластин. Невелике іскріння щіток нереверсивних машин може бути усунуте у деяких випадках незначним зсувом траверси.

В) Щітки в поганому стані та неправильно встановлені в щіткотримачах . Вугільні щітки мають нерівну обгорілу робочу поверхню з подряпинами, набитими мідним пилом; погано пришліфовані; їх краї обламані чи обгоріли. Металеві щітки забруднені, обгоріли, і кінці їх розплющені. Розміри обойм щіткотримачів не відповідають розмірам щіток (надто великий або занадто малий зазор між щіткою та обоймою щіткотримача);

поганий контакт між щітками та їх арматурою; мало перетин струмопровідних кабельків (джгутиків).

Правильно встановити щіткотримачі та щітки. Вугільні щітки ретельно пришліфувати до колектора скляною шкіркою. Металеві щітки промити в бензині та пригнати до колектора.

Г) Щіткотримачі встановлені неправильно . Занадто велика відстань між обоймою щіткотримача та колектором; встановлення реактивного щіткотримача не відповідає напрямку обертання. Внаслідок цих недоліків щітка заклинюється.

Правильно встановити щіткотримачі.

Д) Щіточний бракет слабо закріплений і тому вібрує . Підтягнути болти, що кріплять брак до траверси.

Е) Щітки слабо прилягають до колектора .

Сильніше притиснути щітки; у разі потреби укоротити натискну пружину щіткотримача, але краще замінити її новою. У щіткотримачів, що допускають регулювання натискання на щітку, встановити потрібне натискання. Рекомендоване натискання щіток та його перевірку див. у додатках 4 та 5.

Ж) Щітки занадто сильно притиснуті до колектора .

Послабити натискання щіток; у разі потреби розтягнути натискну пружину щіткотримача, але краще замінити її новою. У щіткотримачів, що допускають регулювання натискання на щітку, встановити потрібне натискання.

З) Поставлені вугільні щітки невідповідної марки (занадто м'які або надто тверді) . Використані щітки різних марок (це нерідко трапляється при заміні щіток, що спрацювалися). Внаслідок різної провідності щіток навантаження ними розподіляється нерівномірно.

Встановити щітки, що відповідають розпорядженню заводу-виробника. Застосовувати щітки лише однієї марки (вибір щіток – див. додаток 5). Якщо однакові щітки для всієї машини отримати неможливо, то розподілити щітки таким чином, щоб на кожному бракеті знаходилися щітки тільки однієї марки. У разі іскріння щіток, що триває, знизити навантаження.

І) Натискання на щітки неоднаково, внаслідок чого струм між ними розподіляється нерівномірно.

Регулюванням щіткотримачів домогтися, щоб натискання на всі щітки було однаковим у межах допуску.

К) Поганий контакт у струмозбиральних кільцях ; ослаблені стяжні болти; забруднені або окислені контактні поверхні в місцях з'єднання бракетів щіткотримачів і струмозбиральних кілець, між щіткотримачами і ракетами, між щітками і щіткотримачами, що призводить до нерівномірного розподілу струму між окремими стрижнями, особливо у машин на велику силу струму.

Перевірити, вичистити і виправити всі контакти струмопровідної та токозбиральної систем: між бракетами щіткотримачів та токозбиральни-

ми кільцями, між струмопідвідними кабелями та токозбиральними кільцями, між щіткотримачами та стрижнями щіткотримачів, між щітками та щітками. Місця поганого контакту зазвичай легко виявляються при зовнішньому огляді, тому що вони сильно нагріваються і часто мають кольори втечі.

Якщо ж зовнішнім оглядом не вдається знайти місце поганого контакту, то необхідно виміряти точним вольтметром падіння напруги у всіх зазначених місцях струмоведучої та токозбиральної систем; при поганому контакті падіння напруги буде збільшено.

Л) Спостерігається підвищена вібрація щіткового апарату. Частота власних коливань щіткового апарату збігається з частотою його вимушених коливань (резонансні явища), що викликаються колекторними пластинами або вібрацією колектора . При цьому іскріння посилюється за будь-якої однієї частоти обертання і слабшає при зменшенні або збільшенні її.

Збільшити жорсткість щіткового апарату, наприклад, скріпити кінці планками з ізолюючого матеріалу (гетинакс, текстоліт), прикріпивши їх гвинтами до торців бракет.

М) Головні та додаткові полюси розташовані нерівномірно .

Перевірити відстані між краями черевиків сусідніх головних полюсів, а також між краями черевиків додаткових та сусідніх головних полюсів. За досвідченими даними, відстані в першому випадку не повинні відрізнятися один від одного більш ніж на 1,5 мм при діаметрі якоря до 600 мм і на понад 2 мм при діаметрі якоря понад 600 мм; у другому випадку відстані не повинні відрізнятися один від одного більш ніж на 1 мм.

Асинхронні двигун.

– Виблискування щіток та обгорання контактних кілець.

Щітки виблискують; деякі щітки та їх арматура сильно нагріваються та обгорають.

А) Щітки погано пришліфовані .

Пришліфувати щітки до контактних кілець скляною шкіркою. Застосовувати для шліфування щіток наждачний папір не можна.

Б) Щітки не можуть вільно рухатися в обоймі щіткотримача, що погіршує контакт між контактними кільцями та щітками .

Поставити щітки такого розміру, щоб вони вільно пересувалися та не затискалися в обоймі щіткотримача; у разі потреби припиляти та пришліфувати щітки. Нормальний зазор між щіткою та обоймою становить 0,2-0,3 мм.

В) Контактні кільця та щітки забруднені. Іноді причиною забруднення є потрапляння олії з підшипника .

Очистити контактні кільця та щітки від бруду та про

терти їх чистою неволокнистою ганчіркою, трохи змоченою бензином. Усунути причини влучення масла з підшипника.

Г) Контактні кільця мають нерівну поверхню або б'ють .

Відшліфувати або обточити контактні кільця.

Д) Щітки слабо притиснуті до контактних кільців .

Відрегулювати натискання щіток за заводськими нормами.

Е) Поставлено щітки невідповідної марки .

Поставити щітки, запропоновані заводом, або вибрати щітки відповідної марки.

Ж) Струм нерівномірно розподіляється між окремими щітками . Це може бути через поганий контакт у ланцюгу щіткотримачів і струмопідведення, неоднакового натискання щіток або застосування щіток різних марок.

Перевірити та виправити всі контакти траверси, струмопідводів, щіткотримачів та щіток. Відрегулювати рівномірне натискання щіток відповідно до застосовуваної марки щіток. Застосовувати щітки лише однієї марки. У разі неможливості отримання однакових щіток для всієї машини розподілити щітки таким чином, щоб на кожному кільці були поставлені щітки лише однієї марки.

– Перегрів активної сталі статора

- Активна сталь статора рівномірно перегріта, хоча навантаження двигуна не перевищує номінальної.

Напруга мережі вища за номінальну.

Зменшити напругу мережі до номінальної. Якщо це неможливо, то посилити вентиляцію двигуна, запитавши завод-виробник про способи її посилення. Якщо і після посилення вентиляції перегрів усередині сталі буде вищим від допустимого і виникне побоювання за безперебійну роботу двигуна, то замінити двигун іншим, що відповідає напрузі мережі.

- Спостерігається підвищене місцеве нагрівання активної сталі при холостому ході двигуна та номінальній напрузі мережі.

А) Між окремими листами активної сталі є місцеві замикання, викликані задирками, що утворилися при тирсі, або через зачеплення ротора об статор під час роботи двигуна.

Видалити задирки; обробити місця замикання гострим напилком; роз'єднати сполучні листи сталі і пролакувати їх ізоляційним лаком повітряного сушіння.

Б) Відбулося з'єднання між стяжними болтами та активною сталлю (у машинах старої конструкції) .

Виправити ізоляцію стяжних болтів або замінити пошкоджені болти на нові; в більшості випадків для цього необхідно зробити часткове або повне перемотування статора обмотки.

В) Зубці активної сталі в окремих місцях вигоріли і оплавилися внаслідок коротких замикань в статорній обмотці або пробою обмотки на корпус.

Вирубати чи вирізати пошкоджені місця. Між окремими листами прокласти тонкий електрокартон чи пластинки слюди та пролакувати їх ізоляційним лаком. Такий спосіб ремонту зазвичай дає хороші результати при ретельному ізолюванні один від одного окремих листів усередині

сталі для запобігання утворенню нових внутрішніх замикань. При великій кількості пошкоджень сталі необхідно зробити повну перешихтування її, що пов'язано з перемотуванням статора. До укладання обмотки необхідно виправлену активну сталь статора випробувати відсутність замикань між листами. Випробування проводиться за допомогою обмотки, що намагнічує, живиться однофазним струмом при індукції всередині сталі, що дорівнює 1 Тл (див. додаток 10, розд. Ж). Відсутність місцевих перегрівів усередині сталі свідчить про задовільний ремонт.

– Перегрів статора обмотки

• Спостерігається загальний рівномірний перегрів усієї обмотки статора.

А) Двигун перевантажений, або порушено його нормальну вентиляцію .

Б) Напруга на затискачах двигуна нижче номінального, внаслідок чого двигун при номінальній потужності перевантажений струмом .

Підвищити напругу до номінальної чи зменшити навантаження до номінальної сили струму.

В) Обмотка статора з'єднана не зіркою, а трикутником. З'єднати обмотку статора зіркою .

• Обмотка статора місцями сильно нагрівається. Сила струму в окремих фазах неоднакова. Двигун сильно гуде і розвиває знижений крутний момент.

А) Міжвиткове з'єднання в обмотці статора .

Б) Неправильно з'єднані котушки однієї фази; одна чи кілька котушок «перевернуті».

В) Обмотка однієї фази замкнута на землю у двох місцях .

Знайти за допомогою мегомметра або контрольної лампи місце замикання обмотки на землю та усунути це замикання; у разі потреби перемотати пошкоджені котушки.

Г) Коротке замикання між двома фазами .

Знайти місце короткого замикання. Пошкоджене місце відремонтувати або перемотати пошкоджену частину обмотки.

– Одностороннє тяжіння ротора

Під час роботи двигуна відбувається зачіплення ротора за статор .

А) Порушена правильність зазору між статором і ротором внаслідок зношування вкладишів підшипників» зсуву підшипникових щитів, неправильної установки підшипникових стояків, деформації сталі статора або ротора, вигину валу .

Перевірити зазор між шийками та вкладишами та у разі потреби перезалити вкладки або замінити їх новими; вивірити зазор між ротором і статором; за відсутності настановних штифтів у підшипникових стояках поставити їх; при деформації стали статора обпилити її гострим напилком, уникаючи, однак, при цьому утворення задирок; при деформації стали ротора обточити його або відшліфувати наждачним колом; перевірити вал.

Б) Ротор погано відбалансований .

Збалансувати ротор.

В) Міжвиткове з'єднання та різні короткі замикання в обмотці статора або неправильне з'єднання фаз статора. Це порушує симетрію магнітного потоку, і ротор піддається односторонньому тяжінню. При цьому ротор притягується до сторони статора, протилежної пошкодженому місцю, так як в останньому магнітний потік буде ослаблений дією короткозамкнутої частини обмотки.

– Ненормальний шум у машині.

Двигун сильно гуде. Сила струму у всіх фазах різна. Нагрів обмотки статора нерівномірний.

А) Коротке замикання в статорній обмотці .

Б) Обмотки статора з'єднані неправильно .

В) Число витків в окремих котушках обмотки статора неоднаково . Гудіння спостерігається тільки у разі наявності паралельних гілок в обмотці та при з'єднанні фаз трикутником. При послідовному з'єднанні всіх котушок і з'єднанні фаз зіркою неоднакове число витків в окремих котушках не викликає гудіння, тільки сила струму в окремих фазах різна.

Від'єднати всі три фази та паралельні гілки один від одного. По черзі дати кожну фазу (при послідовному з'єднанні всіх котушок) чи кожну гілка (при паралельному з'єднанні котушок) змінний струм і виміряти вольтметром напруга окремих котушкових групах. На котушкових групах, що мають менше витків, напруга буде меншою, ніж на справних котушкових групах. Найбільша допустима різниця напруги на окремих котушкових групах не повинна перевищувати 5 %.

Випробування допустиме як при вставленому, так і при вийнятому роторі. При вставленому та розімкнутому фазному роторі випробування можна проводити при номінальній напрузі. При вийнятому роторі або при вставленому короткозамкненому роторі напруга, підведена до статора, не повинна перевищувати 15-20% номінальної напруги двигуна.

Можна також провести перевірку числа витків котушок статора, литий двигун з боку ротора (при фазному роторі).

Висновки.

1. Електричні машини є основою сучасного електроприводу й електроенергетичних систем, забезпечуючи перетворення електричної енергії в механічну та навпаки.
2. Основу їх роботи становлять три закони електродинаміки: закон електромагнітної індукції, закон електромагнітних сил та закон повного струму.
3. Машини поділяються за родом струму на постійного та змінного струму. До останніх належать асинхронні, синхронні й колекторні.
4. Машини постійного струму характеризуються колекторною системою, що забезпечує комутацію струму, але потребує регулярного технічного обслуговування (щітки, колектор).

5. Асинхронні двигуни відзначаються простою конструкцією, високою надійністю та широким застосуванням у промислових приводах. Основні типи — з короткозамкненим і фазним ротором.

6. Синхронні машини використовуються у генераторах електростанцій, компенсаторах та потужних приводах, характеризуються постійною швидкістю обертання й високим ККД.

7. Типові несправності електричних машин включають іскріння щіток, перегрів обмоток, вібрацію, шум, одностороннє тяжіння ротора та міжвиткові замикання.

8. Для забезпечення надійної роботи машин необхідно застосовувати методи технічної діагностики — перевірку ізоляції, балансування ротора, вимірювання опору обмоток, контролювання зазорів тощо.

9. Ремонт електричних машин включає профілактичне обслуговування, заміну щіток, перемотування обмоток, шліфування колектора, перевірку підшипників, відновлення ізоляції та усунення механічних дефектів.

10. Своєчасна діагностика та регламентні роботи запобігають аварійним зупинкам обладнання, продовжують термін служби машин і підвищують ефективність промислових систем електроприводу.

Контрольні питання.

1. Які основні закони електромеханіки лежать в основі роботи електричних машин?

2. Які основні елементи конструкції машин постійного струму?

3. Для чого призначений колектор у машині постійного струму?

4. Які переваги та недоліки має асинхронний двигун?

5. Чим відрізняється асинхронний двигун із короткозамкненим ротором від двигуна з фазним ротором?

6. Як визначається синхронна частота обертання магнітного поля в машинах змінного струму?

7. У чому полягає принцип роботи синхронної машини?

8. Які основні типи синхронних машин за конструкцією ротора ви знаєте?

9. Які основні причини іскріння щіток у машинах постійного струму?

10. Як усуваються дефекти контактної системи (щітки, кільця, траверси)?

11. Які основні причини перегріву активної сталі статора?

12. Як перевіряють міжвиткові замикання в обмотках статора?

13. Що означає явище одностороннього тяжіння ротора та які його наслідки?

14. Як здійснюється балансування ротора електричної машини?

15. Які методи діагностики застосовують для визначення стану ізоляції електричних машин?

16. Які заходи профілактичного обслуговування дозволяють продовжити термін служби електричних машин?

17. У чому полягає різниця між ремонтами поточного та капітального рівня?

18. Які правила потрібно дотримуватися при перемотуванні обмоток?

19. Які наслідки порушення симетрії магнітного поля у трифазній машині?

20. Як забезпечується охолодження електричних машин і яку роль воно відіграє у їх надійності?

Використана література.

1. Електричні машини : курс лекцій : навч. посіб. / Ю.А. Гайденко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.

2. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва; за ред. В.І. Мілих. Харків : ФОП Панов А.М., 2018. 452 с.

ТЕМА 4. СПОСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН. ОСОБЛИВОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗІ ЗМІННОЮ ШВИДКІСТЮ

Принципи регулювання швидкості двигунів постійного та змінного струму. Застосування перетворювачів частоти. Порівняння способів регулювання. Практичні аспекти експлуатації.

Принципи побудови керування двигуна постійного струму (ДПС)

Поряд із розвитком і розширенням застосування безконтактних систем керування електроприводами, у промисловості все ще широко експлуатуються схеми релейно-контакторного керування. Такі схеми, як правило, використовуються у розімкнених системах регулювання швидкості й забезпечують виконання низки основних функцій — автоматичний пуск і зупинка двигуна, узгодження роботи на різних ступенях швидкості, реверсування, гальмування, а також захист електроприводу у разі аварійних режимів. Крім того, вони дозволяють здійснювати взаємне блокування між кількома приводами, забезпечуючи узгоджену роботу технологічних агрегатів.

До основних переваг релейно-контакторних схем керування належать їхня конструктивна простота, зручність у проєктуванні та розрахунках, а також легкість у технічному обслуговуванні. Для їх наладки не потрібно залучати висококваліфікований персонал, що робить такі системи придатними для експлуатації у виробничих умовах із невисокими вимогами до точності керування.

Разом з тим, такі схеми мають низку суттєвих недоліків, серед яких:

- різке зростання складності при необхідності підвищення якості регулювання;
- великі габарити, значна маса та висока вартість станцій керування, особливо для електродвигунів середньої й великої потужності;
- неможливість застосування в пожежо- та вибухонебезпечних середовищах;
- низька точність підтримання заданих режимів при дії зовнішніх збурень.

Незважаючи на вказані недоліки, релейно-контакторні системи керування продовжують широко застосовуватись у складі електроприводів, до яких не висуваються високі вимоги щодо точності регулювання в динамічних режимах. Такі системи залишаються ефективним і надійним рішенням для простих технологічних механізмів, де основними критеріями є економічність, простота обслуговування та довговічність елементів схеми.

Схеми пуску двигунів постійного струму (ДПС) призначені для автоматизації процесу розгону електроприводу, обмеження пускових струмів та запобігання можливим помилкам під час запуску.

Пуск двигуна паралельного або незалежного збудження зазвичай здійснюється за допомогою пускового резистора, увімкненого послідовно

в коло якоря. Цей резистор служить для обмеження струму в момент увімкнення. У міру розгону двигуна окремі секції резистора поетапно вимикаються. Після завершення процесу пуску резистор повністю виводиться з кола, і двигун працює на природній механічній характеристиці (рис. 4.1).

На рис.4.2 наведено пускову діаграму двигуна постійного струму з трьома ступенями пускового реостата. Із цієї діаграми видно, що послідовне вимикання резисторів під час розгону двигуна має відбуватись при досягненні певних кутових швидкостей обертання (ω_1, ω_2, ω_3), відповідних струмів (I_1, I_2) або через встановлені проміжки часу (t_1, t_2, t_3). Отже, керування процесом пуску може здійснюватися за однією з функцій — швидкості, струму чи часу. У деяких випадках застосовується також керування у функції шляху руху робочого органу механізму, хоча такий підхід використовується досить рідко.

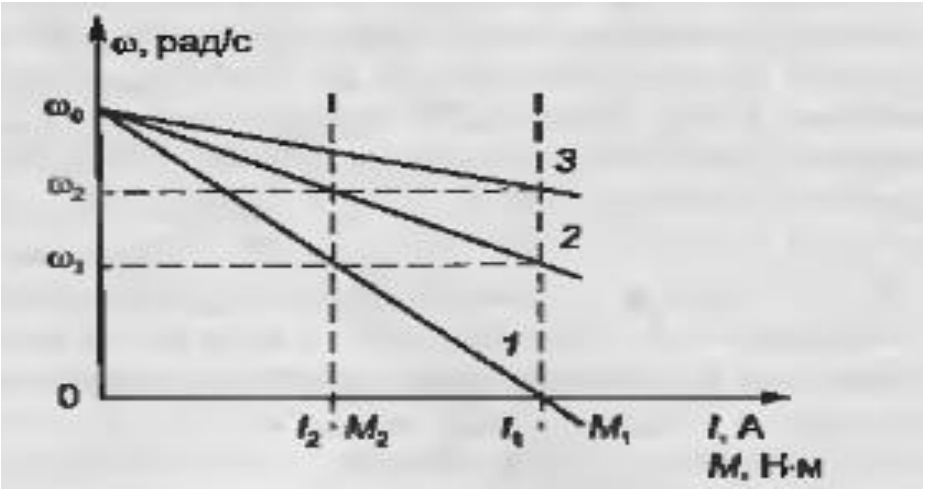


Рисунок 4.1 – Механічні характеристики ДПС паралельного збудження (ω - кувота швидкість обертання, I_1, M_1 - пікові значення струму та моменту, I_2, M_2 - значення струму та моменту переключення)

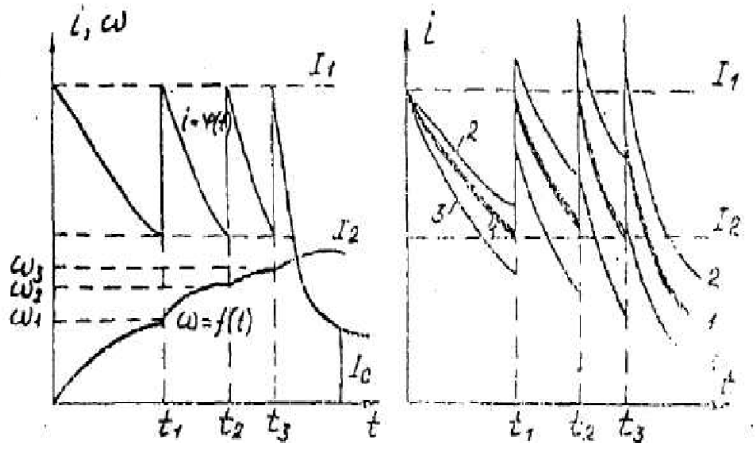


Рисунок 4.2 – Криві вимірів струму і швидкості при триступеневому пуску ДПС у функції часових для розрахункового (1) завищеного (2) і заниженого (3) навантаження на валу двигуна

В сучасних електроприводах двигунів постійного струму застосовується кілька типових принципів побудови схем автоматичного пуску. Вибір конкретного методу залежить від технологічних вимог, динамічних характеристик приводу та необхідної точності регулювання. Найпоширенішими є схеми, у яких процес пуску здійснюється у функції кутової швидкості (ЕРС), струму або часу. Кожен із цих способів має власні переваги й обмеження, що визначають доцільність їх застосування в різних умовах експлуатації.

Схеми рис.4.3 – рис.4.5 призначені для автоматичного пуску (кнопка SB1) двигуна постійного струму паралельного (незалежного) збудження у функції швидкості (ЕРС) – рис.4.3 , струму – рис.4.4 , часу – рис.4.5 і динамічного гальмування по команді «Стоп» здійснюється кнопкою SB2. У схемі передбачене ручне регулювання потоку машини $R_в$, нульової КМ і максимально-струмовий КА захист. Обмеження пускових струмів здійснюється резисторами R_1, R_2, R_3, включеними послідовно в якірне коло і шунтованими у міру розгону двигуна залежно від прийнятого принципу керування пуском. Схеми рис.4.3 і рис.4.5 здійснюють динамічне гальмування по команді «Стоп» (кнопка SB2). Обмотки збудження LM машин зашунтировані розрядними резисторами Rр, що знімають перенапругу при комутації.

Керування пуском двигуна у функції кутової швидкості (ЕРС)

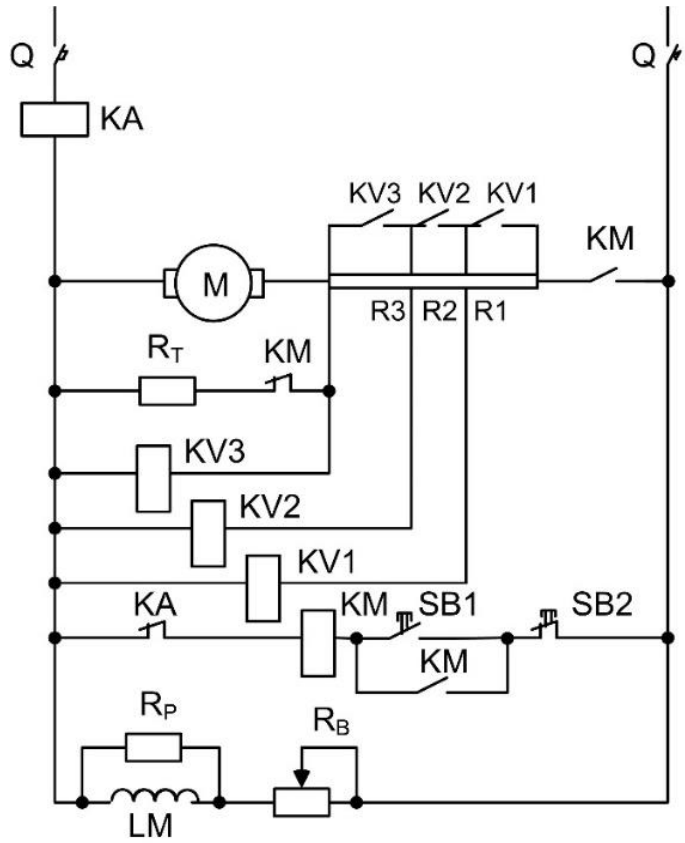


Рисунок 4.3 – Схема автоматичного пуску ДПС в функції швидкості (ЕРС)

Керування пуском двигуна у функції кутової швидкості (ЕРС) ґрунтується на принципі поступового шунтування пускових резисторів у міру зростання швидкості обертання вала двигуна. У таких схемах (рис. 4.3) контроль швидкості здійснюється за допомогою тахогенераторів, відцентрових реле або вимірювання електрорушійної сили (ЕРС) двигуна.

Під час пуску контактори KV_1, KV_2, KV_3 спрацьовують при досягненні розрахункових значень ЕРС, що відповідають певним швидкостям обертання — ω_1, ω_2, ω_3, послідовно шунтуючи пускові резистори. Після завершення розгону всі контактори залишаються ввімкненими на напругу мережі, а двигун переходить у сталий режим роботи на природній механічній характеристиці.

Керування пуском двигуна у функції струму

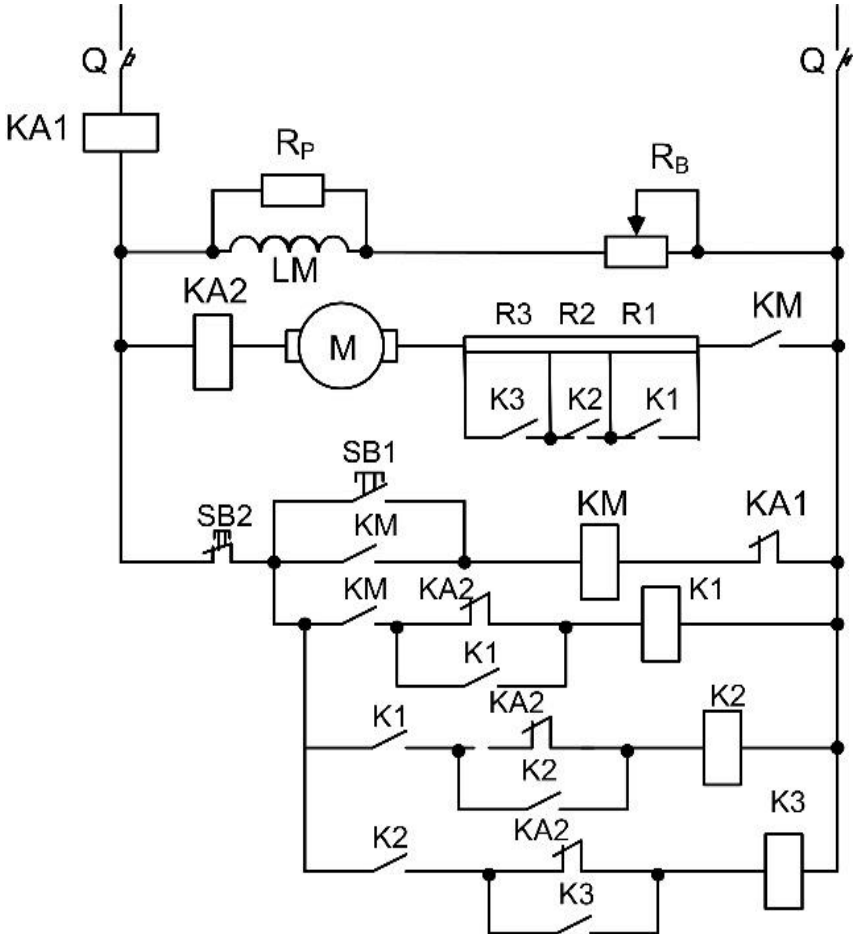


Рисунок 4.4 – Схема автоматичного пуску ДПС в функції струму

Керування пуском двигуна у функції струму базується на контролі величини струму в якірному колі за допомогою спеціальних струмових реле (рис. 4.4). У найпростішому варіанті схема містить одне струмове реле КА2, ввімкнене послідовно в коло якоря. Його розмикаючі контакти встановлюються у колах контактів прискорення К1, К2, К3. Під час пуску реле спрацьовує від великого пускового струму, не дозволяючи вмикати контактори прискорення. У міру розгону двигуна струм поступово змен-

шується, реле відпускає, контакти замикаються, і вмикається перший контактор прискорення К1, який шунтує резистор R1. Цей процес повторюється для наступних ступенів — R2 і R3, що забезпечує поступове виведення резисторів з кола.

Недоліком таких схем є залежність процесу пуску від статичного моменту навантаження. Якщо момент перевищує розрахунковий, струм не встигає знизитися до рівня спрацьовування реле, через що пусковий резистор може залишатися у колі занадто довго, спричиняючи перегрівання і можливі пошкодження елементів.

Керування пуском двигуна у функції часу

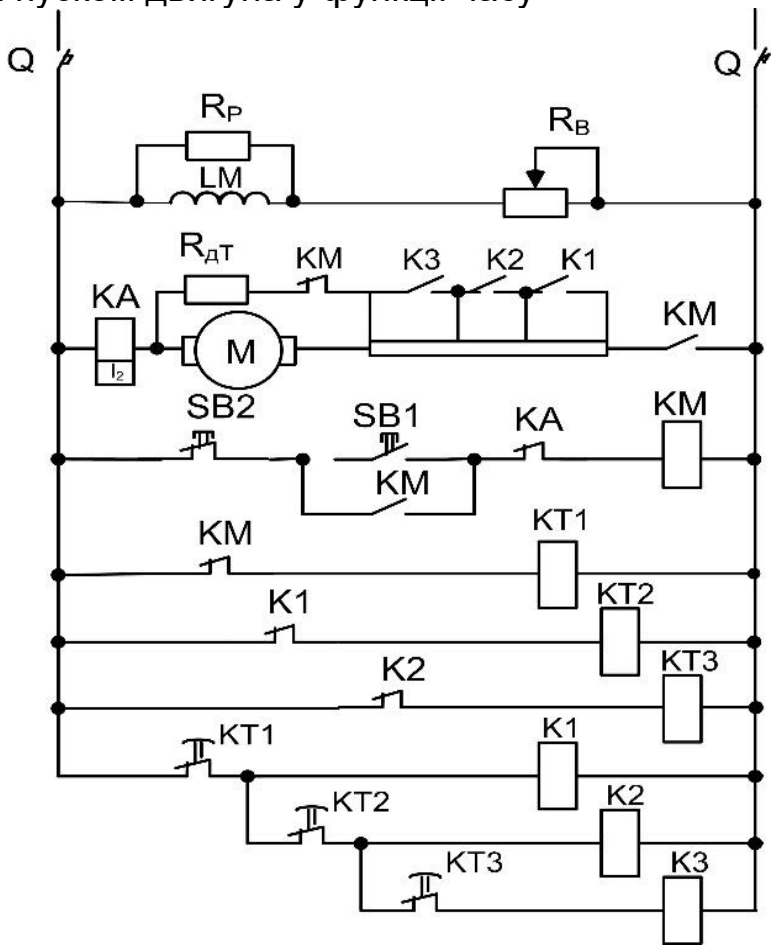


Рисунок 4.5 – Схема автоматичного пуску ДПС в функції часу

Керування пуском двигуна у функції часу (рис. 4.5) передбачає автоматичне виведення ступенів пускового резистора через визначені часові інтервали, встановлені відповідно до пускових характеристик ω = f(t) і I = f(t). Для реалізації цього принципу використовуються реле часу, які керують контактами прискорення К1, К2, К3 незалежно від фактичних значень струму або швидкості.

Перевагою такого підходу є простота та висока надійність у роботі, адже пуск відбувається за стабільним часовим алгоритмом, що не залежить від зміни навантаження. Проте при значних відхиленнях фактичного

моменту опору від розрахункового можливі певні коливання струму або подовження часу розгону.

Такі схеми набули широкого застосування в промислових електроприводах завдяки використанню електромагнітних, електронних або пневматичних реле часу, які забезпечують точне дотримання заданих інтервалів пуску та захист двигуна від перевантажень.

Схеми гальмування двигунів постійного струму

Схеми гальмування двигунів постійного струму (ДПС) призначені для зупинки електроприводу або зниження швидкості його обертання в керований спосіб. Найпоширенішими є режими динамічного гальмування та гальмування противмиканням, які реалізуються за допомогою комутаційних елементів — контакторів, реле струму чи швидкості.

Схеми гальмування двигунів постійного струму (ДПС) застосовуються для плавного зниження швидкості обертання або повної зупинки електропривода. Залежно від характеру процесу розрізняють динамічне гальмування та гальмування противмиканням. У динамічному режимі кінетична енергія ротора перетворюється в електричну й розсіюється у вигляді тепла в гальмівному резисторі. При гальмуванні противмиканням полярність напруги в колі якоря змінюється на протилежну, завдяки чому створюється гальмівний момент, спрямований проти обертання вала.

У типових схемах (рис. 4.6, а–в) процес гальмування реалізується автоматично після натискання кнопки SB2 «Стоп», а момент і тривалість гальмування визначаються характеристиками кола, у яке підключається якір двигуна.

У схемах динамічного гальмування двигуна постійного струму реалізується принцип перетворення механічної енергії обертання в теплову енергію, що розсіюється у гальмівному резисторі. На рис.4.6, а зображено схему гальмування у функції кутової швидкості (ЕРС). Після відключення головного контактора КМ його допоміжні контакти замикають коло реле гальмування К1, яке спрацьовує й умикає контактор К2. Останній під’єднує якір двигуна до гальмівного резистора Rдт, створюючи гальмівний момент, що діє до зниження швидкості до мінімального значення, при якому реле К1 розмикає коло К2, завершуючи гальмування.

На рис.4.6, б подано схему гальмування у функції часу. Тут процес зупинки керується реле часу, яке забезпечує необхідну витримку для повної зупинки двигуна. Оскільки гальмівний момент пропорційний кутовій швидкості, зі зниженням швидкості ефективність гальмування поступово зменшується, що збільшує його тривалість. Для скорочення часу зупинки використовують додаткові гальмівні ступені, які підвищують гальмівний струм при переході між ними.

Гальмування противмиканням використовується переважно в реверсивних електроприводах, де після зупинки двигуна часто виконується його пуск у протилежному напрямку. Принцип дії такого гальмування полягає в тому, що напруга, прикладена до кола якоря, змінює свою поляр-

ність на протилежну, а електрорушійна сила двигуна при цьому діє в тому ж напрямку, що й напруга мережі. Це призводить до значного збільшення струму, який створює гальмівний момент, спрямований проти руху ротора.

Для обмеження цього струму послідовно з пусковими резисторами вмикається резистор противмикання, який шунтується реле KV у момент завершення гальмування (рис. 4.6, в). Така схема дозволяє ефективно контролювати гальмівний процес, знижуючи механічні навантаження на вал двигуна та елементи передачі.

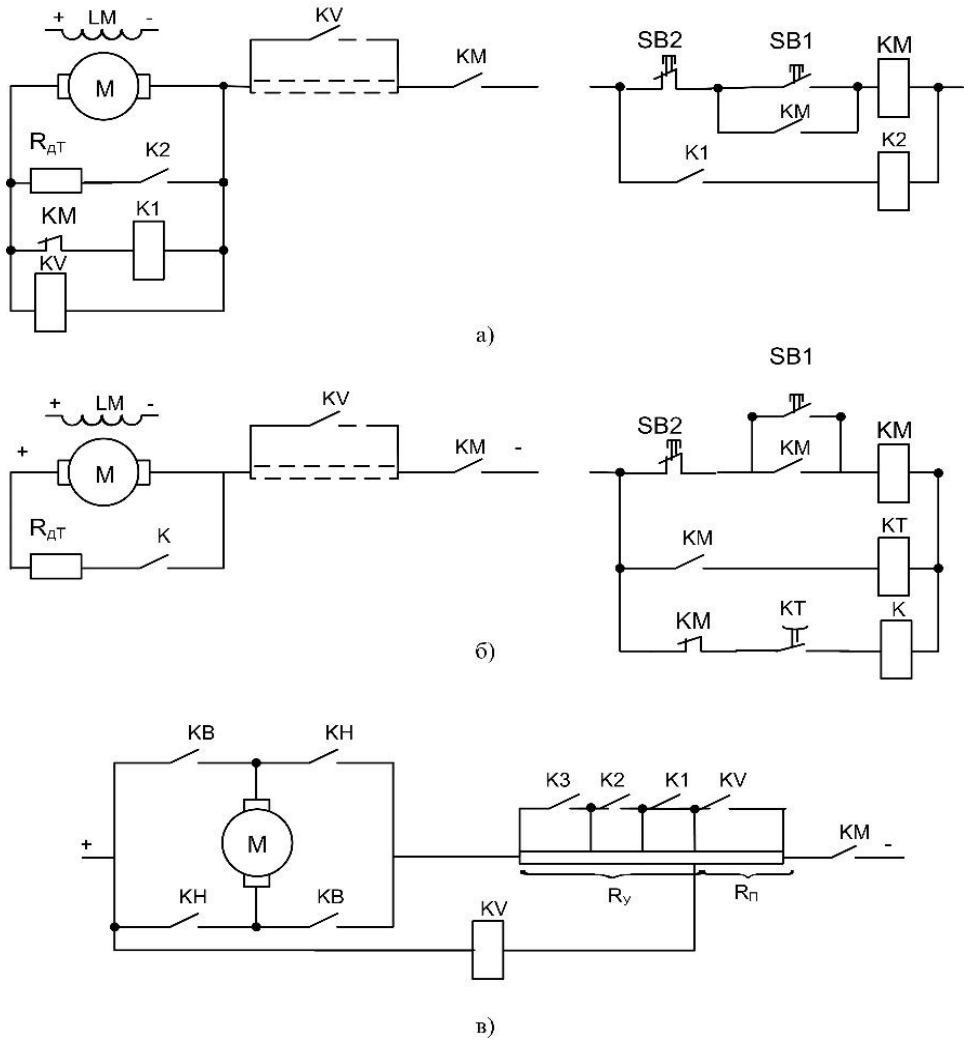


Рисунок 4.6 – Схема автоматичного гальмування ДПС

Типові вузли та схеми керування асинхронним двигуном

Керування асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором.

У промислових електроприводах найширше застосовуються асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором (АДКР). На рис.4.7 подано одну з найпоширеніших схем керування нереверсивним асинхронним двигуном, яка забезпечує надійний запуск, зупинку та захист від повторного самозапуску.

Під час натискання кнопки SB1 «Пуск» подається напруга на котушку магнітного пускача (контактора) КМ, унаслідок чого замикаються його силові контакти КК, і двигун під'єднується до мережі. Одночасно спрацьовує блок-контакт КМ, який шунтує кнопку «Пуск» і забезпечує нульовий захист — у разі короткочасного зникнення напруги двигун не запускається самостійно після її відновлення. Вимкнення електродвигуна здійснюється натисканням кнопки SB2 «Стоп», що розмикає коло живлення котушки пускача, припиняючи подачу напруги на статор.

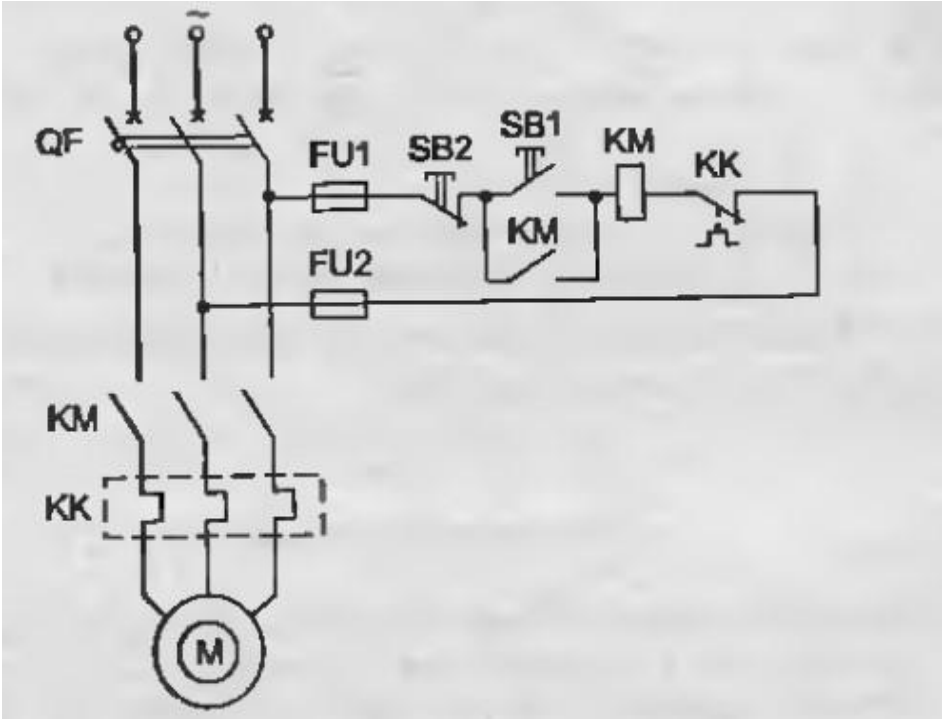


Рисунок 4.7 – Схема керування АДКР з нереверсивним пускачем

На рис.4.8 показано схему керування асинхронним двигуном з реверсивним магнітним пускачем, яка дозволяє змінювати напрям обертання ротора. Для цього в схемі використано два контактори — КМ1 і КМ2, що забезпечують підключення обмоток статора до мережі із зміненим чергуванням фаз.

Під час натискання кнопки SB1 «Пуск» спрацьовує контактор КМ1, який підключає двигун до трифазної мережі в прямому напрямі. Для зміни напряму обертання (реверсу) спочатку натискається кнопка SB3 «Стоп», що розриває коло КМ1, після чого натискається кнопка SB2 «Реверс», яка вмикає контактор КМ2. При цьому чергування фаз змінюється, і двигун починає обертатися у зворотному напрямку.

Для запобігання одночасному вмиканню обох контакторів у схемі передбачено електричне блокування за допомогою розмикаючих контактів КМ1 та КМ2, що гарантує безпечну роботу системи.

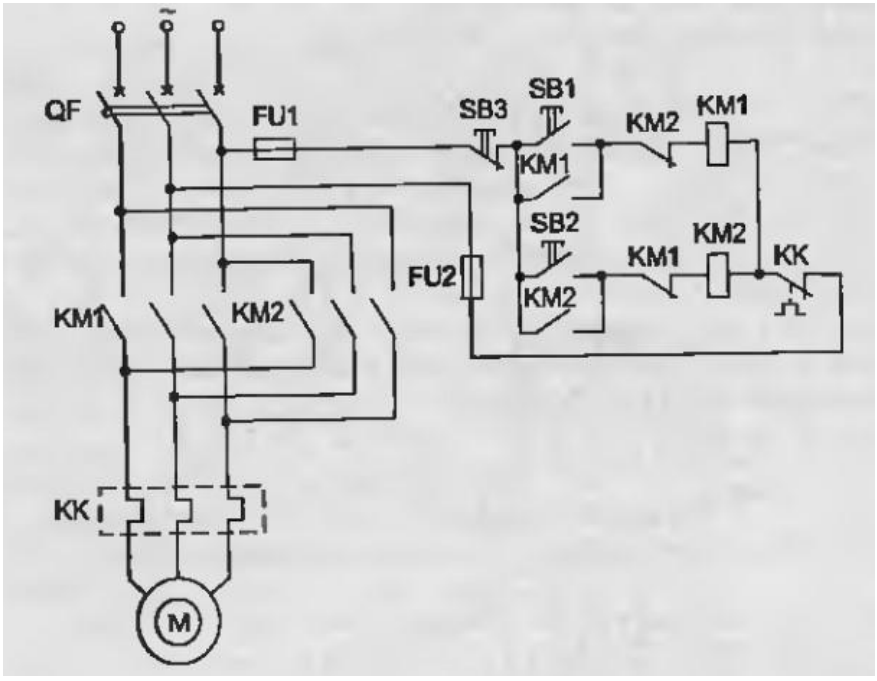


Рисунок 4.8 – Схема керування АДКР з реверсивним пускачем-

Вузли та схеми гальмування асинхронного електродвигуна

Динамічне гальмування асинхронного двигуна здійснюється шляхом відключення його від трифазної мережі змінного струму та подальшого підключення обмоток статора до джерела постійного струму. У цьому режимі в обмотках статора створюється постійний магнітний потік, який, взаємодіючи зі струмом у роторі, генерує гальмівний момент, що зупиняє двигун.

На рис.4.9 наведено схему прямого пуску асинхронного двигуна з динамічним гальмуванням у функції часу. Під час запуску двигуна через контактор КМ1 одночасно замикається коло живлення реле часу КТ, яке готує систему до подальшого гальмування. Для зупинки двигуна натискається кнопка SB2 «Стоп», при цьому контактор КМ1 знеструмлюється, розмикаючи коло статора, і одночасно замикається коло КМ2, що підключає статор до джерела постійного струму.

Реле часу КТ забезпечує витримку, необхідну для повної зупинки двигуна, після чого коло КМ2 розмикається. Інтенсивність гальмування регулюється резистором R, а електричне блокування між контактами КМ1 і КМ2 запобігає можливості одночасного підключення статора до різних джерел живлення.

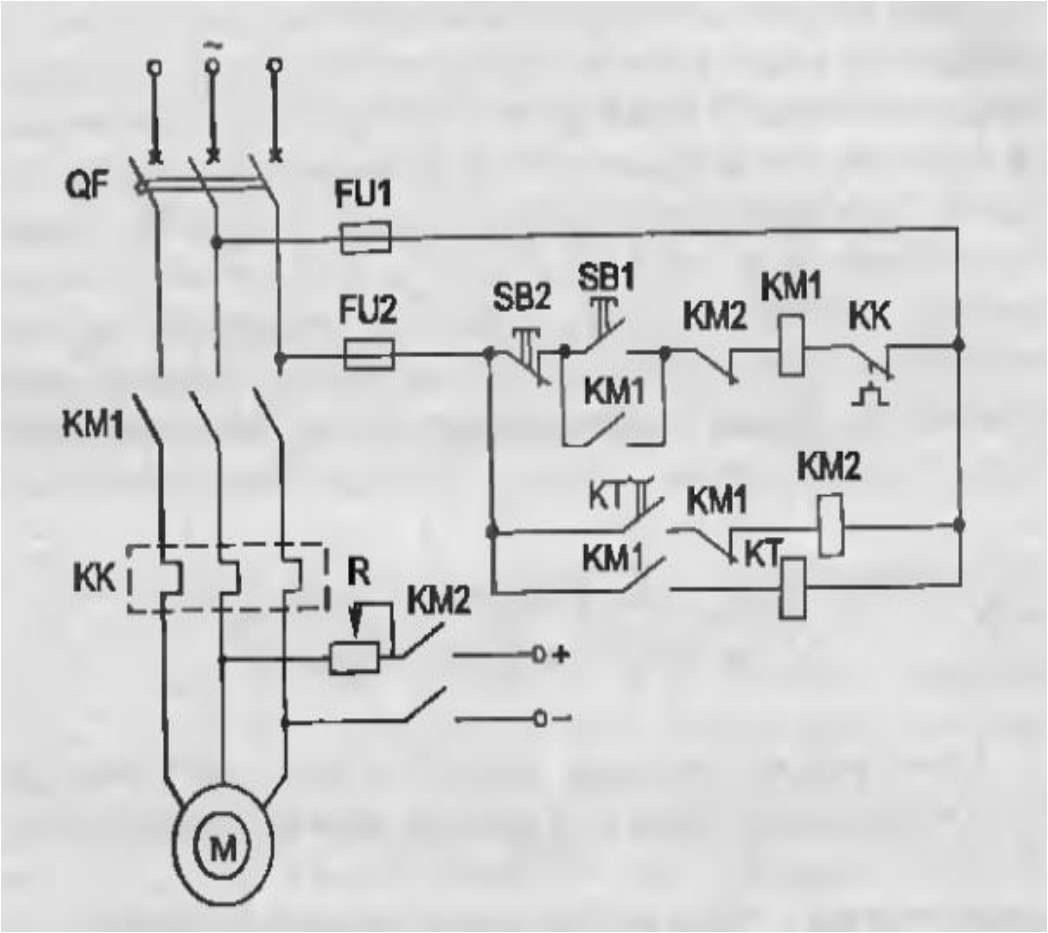


Рисунок 4.9 – Схема керування АДКР з динамічним гальмуванням в функції часу

Керувати динамічним гальмуванням можна в функції швидкості за допомогою реле контролю швидкості SR.

На рис.4.10 представлено схему керування асинхронним двигуном з динамічним гальмуванням у функції швидкості. Принцип її дії полягає в автоматичному відключенні двигуна від трифазної мережі та підключенні його до джерела постійного струму після натискання кнопки SB2 «Стоп».

Під час пуску контактор КМ1 замикає силові контакти, і двигун працює у звичайному режимі. Для гальмування використовується реле контролю швидкості SR, яке замикає або розмикає контакти залежно від фактичної кутової швидкості ротора. Коли швидкість знижується до встановленого мінімального рівня, контакт SR розмикається, унаслідок чого контактор КМ2 знеструмлюється і двигун відключається від мережі постійного струму.

Завдяки такій побудові схема забезпечує автоматичне завершення гальмування при майже повній зупинці ротора, зменшує теплові навантаження на обмотки та запобігає перевищенню допустимого гальмівного струму

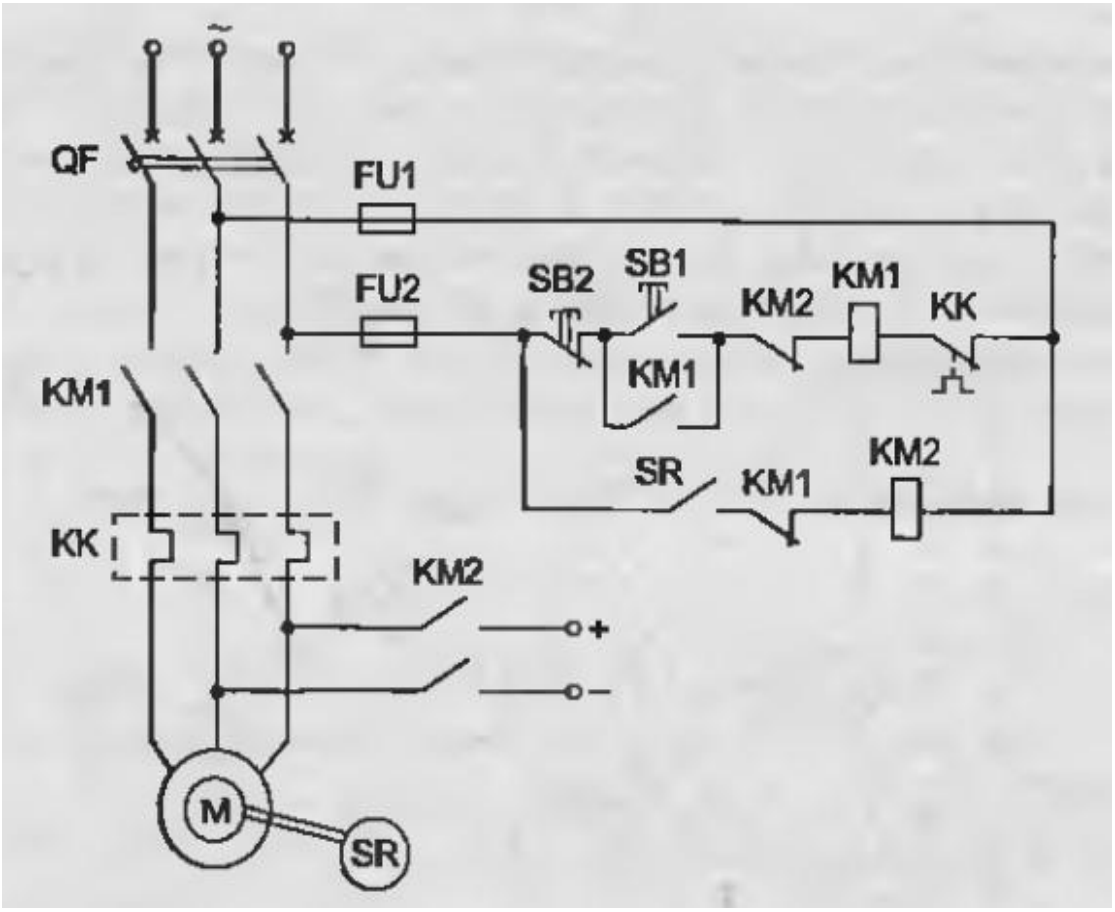


Рисунок 4.10 – Схема керування АДКР з динамічним гальмуванням в функції швидкості

Гальмування противмиканням асинхронного двигуна (рис. 4.11) реалізується шляхом зміни порядку чергування фаз у колі статора, що призводить до створення гальмівного моменту, спрямованого проти обертання ротора. Процес гальмування здійснюється автоматично з урахуванням фактичної швидкості двигуна, яку контролює реле швидкості SR.

Під час пуску натисканням кнопки SB1 «Пуск» спрацьовує контактор КМ1, який підключає статор до мережі трифазного струму. При натисканні кнопки SB2 «Стоп» контактор КМ1 розмикається, а контактор КМ2 вмикається, змінюючи порядок чергування фаз, завдяки чому двигун переходить у режим противмикання. Коли швидкість обертання ротора знижується до мінімального значення, контакт реле SR розмикається, роз'єднуючи коло КМ2 і відключаючи двигун від мережі.

У схемі реалізовано електричне блокування, що запобігає одночасному вмиканню контактів КМ1 і КМ2, забезпечуючи безпечне перемикання режимів роботи.

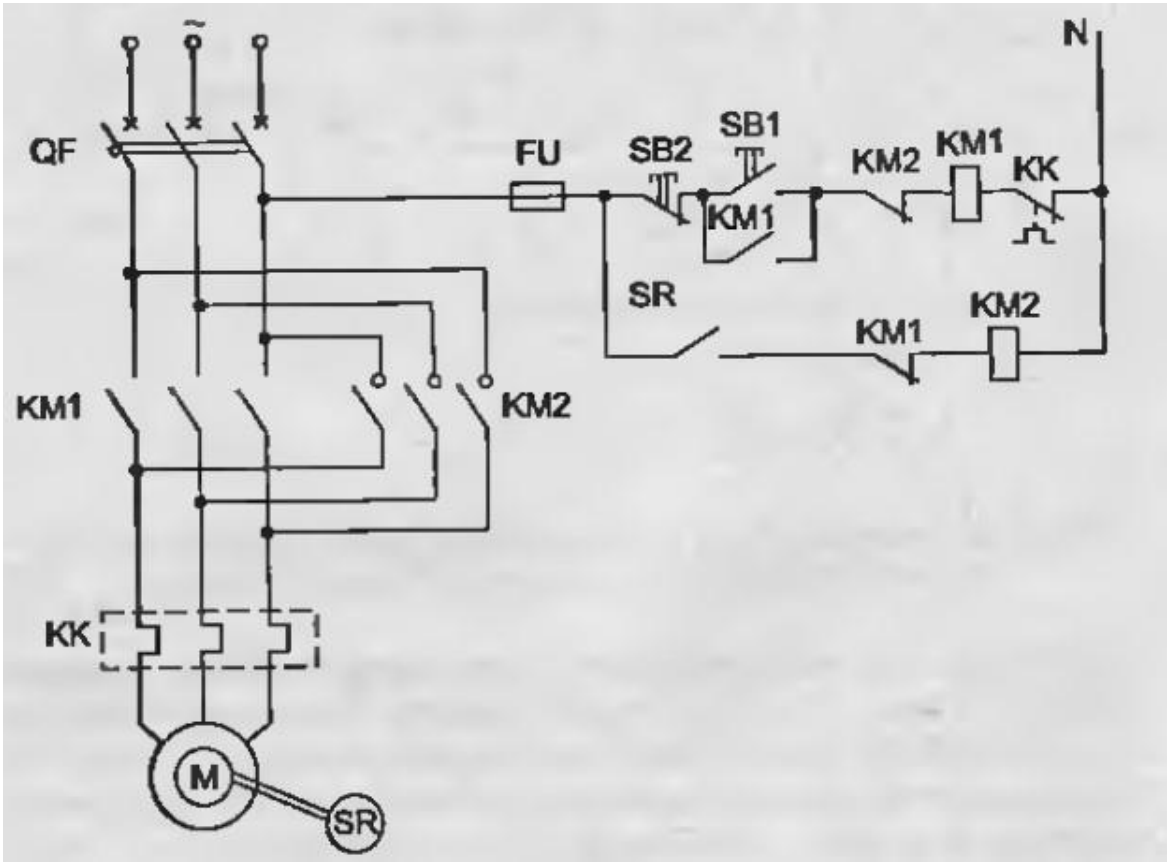


Рисунок 4.11 – Схема керування АДКР з гальмуванням противмиканням

Вузли та схеми керування асинхронним двигуном з фазним ротором.

Асинхронні двигуни з фазним ротором широко застосовуються в електроприводах, де необхідно плавно регулювати швидкість або забезпечити м’який пуск. Пуск таких двигунів здійснюється з використанням резисторів у колі ротора, які обмежують пусковий струм і дозволяють підтримувати задане прискорення під час розгону. У процесі збільшення швидкості резистори поступово виводяться з кола, а після завершення пуску — повністю шунтуються, переводячи двигун на природну механічну характеристику.

На рис.4.12 подано схему пуску двигуна з фазним ротором у два ступені. У ній одночасно подається напруга на силові кола та кола керування за допомогою вимикача QF, а послідовність виведення резисторів визначається заданими інтервалами часу..

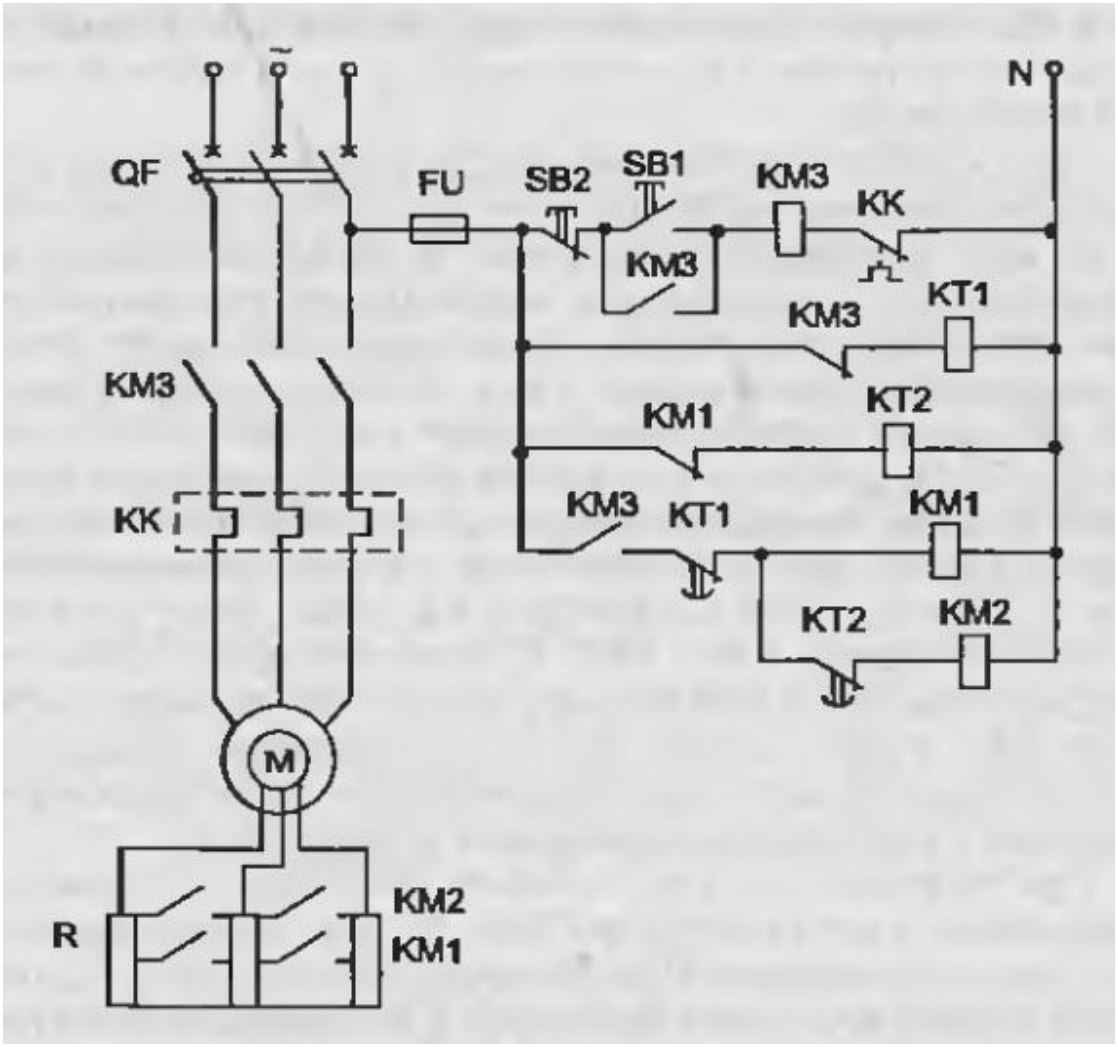


Рисунок 4.12 – Схема пуску двигуна з фазним ротором

У схемі керування асинхронним двигуном з фазним ротором у функції часу використовується послідовність спрацьовування реле часу КТ1 і КТ2, які визначають моменти виведення пускових резисторів. При подачі напруги на коло керування обидва реле спрацьовують і розмикають свої контакти. Натискання кнопки SB1 «Пуск» активує контактор КМ3, який вмикає двигун із повністю введеними резисторами в коло ротора, тоді як контактори КМ1 і КМ2 залишаються вимкненими.

Після закінчення витримки часу КТ1 замикає свій контакт, умикаючи контактор КМ1, який шунтує першу секцію пускового резистора. Одночасно розмикається контакт КМ1 у колі КТ2, і після завершення витримки часу другого реле вмикається контактор КМ2, що шунтує другу секцію резистора. У результаті двигун поступово розганяється до номінальної швидкості, а резистори повністю виводяться з кола, забезпечуючи плавний перехід на сталий режим роботи.

У схемах керування асинхронним двигуном з фазним ротором у функції струму (рис. 4.13) процес пуску контролюється за допомогою струмових реле КА1 і КА2, які реагують на зміну струму в колі ротора. При запуску двигуна через контактор КМ3 у колі ротора повністю введені пускові резистори. Під дією великого пускового струму реле КА1 спра-

цьовує, розмикаючи контакт у колі КМ1, запобігаючи його передчасному ввімкненню.

У міру розгону двигуна струм ротора поступово зменшується, і при досягненні встановленого мінімального значення КА1 відпускає, замикаючи свій контакт — це призводить до спрацювання КМ1, який шунтує першу секцію пускового резистора. Аналогічно діє реле КА2, що контролює наступний ступінь: воно відпускає при подальшому зниженні струму, вмикаючи КМ2, який шунтує другу секцію резистора.

Таким чином, пуск двигуна відбувається автоматично та поступово, залежно від зміни струму в роторі, що забезпечує стабільний режим прискорення та захист від перевантажень. Зупинка двигуна здійснюється натисканням кнопки SB2 «Стоп», яка розриває коло живлення КМ3, відключаючи двигун від мережі.

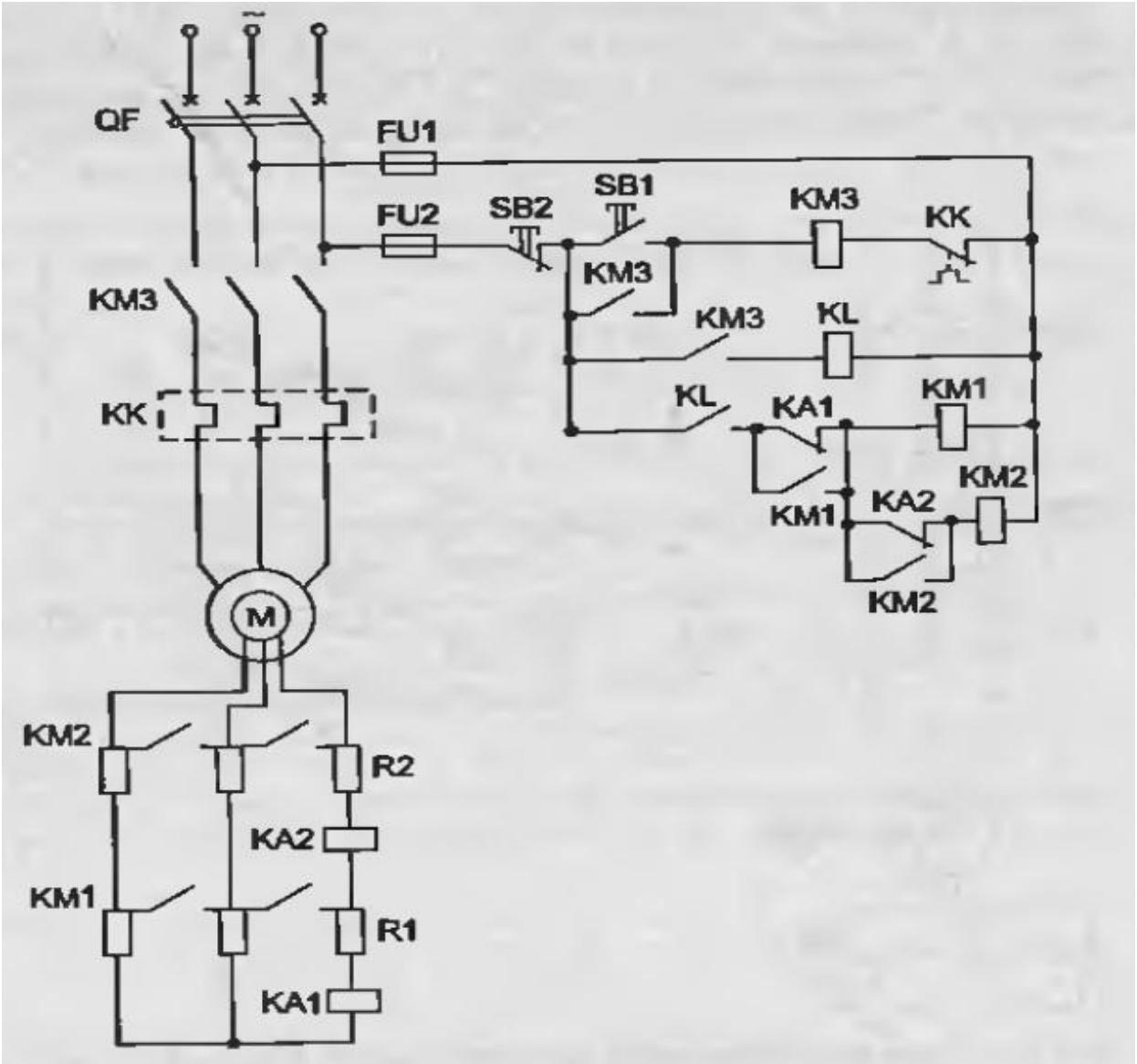


Рисунок 4.13 – Схема пуску двигуна з фазним ротором в функції струму

Схема пуску асинхронного двигуна з фазним ротором в функції часу і динамічним гальмуванням в функції швидкості показана на рис.4.14.

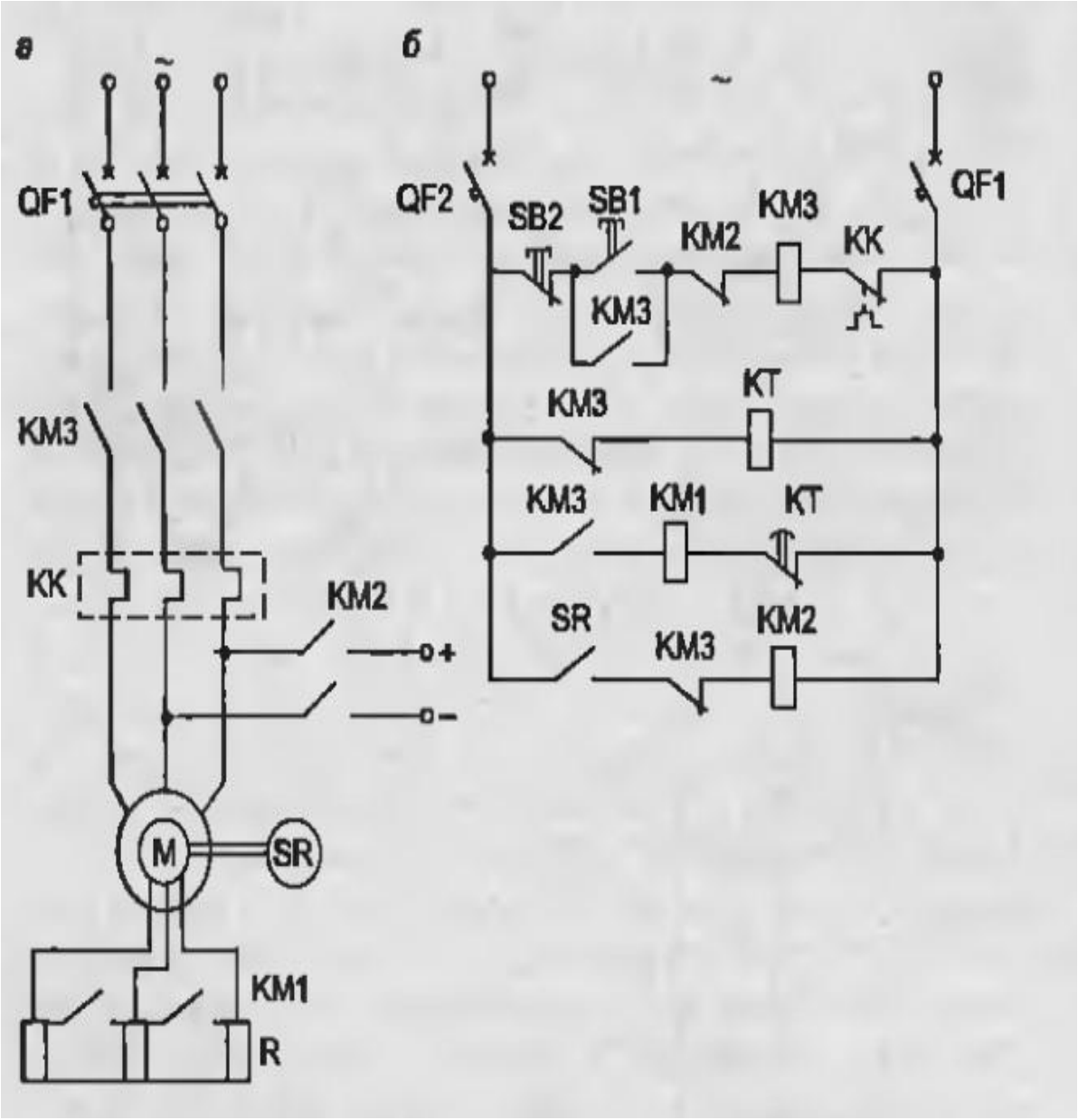


Рисунок 4.14 – Схема пуску двигуна з фазним ротором в одну ступінь в функції часу і динамічного гальмування в функції швидкості: а - силове коло; б- коло керування

На рис.4.14 представлено схему пуску асинхронного двигуна з фазним ротором у функції часу та динамічним гальмуванням у функції швидкості. Після ввімкнення автоматичних вимикачів QF1 і QF2 живлення подається на реле часу КТ, яке розмикає свій контакт у колі КМ1, запобігаючи передчасному спрацьовуванню. Для запуску двигуна натискається кнопка SB1 «Пуск», що активує контактор КМ3 — двигун починає розгін з уведеними резисторами в колі ротора. Одночасно розмикається контакт КМ3, який відключає реле часу від мережі. Після закінчення витримки часу КТ замикає свій контакт, умикаючи КМ1, що шунтує резистори в роторному колі, і двигун переходить на природну механічну характеристику.

Для зупинки двигуна натискається кнопка SB2 «Стоп». У цей момент КМ3 знеструмлюється, розриваючи коло КМ1 і замикаючи коло

КМ2, через яке обмотки статора підключаються до джерела постійного струму. Таким чином, двигун переходить у режим динамічного гальмування. У міру зменшення швидкості контакт реле контролю швидкості SR розмикається, відключаючи КМ2 та завершуючи гальмування. Після цього схема повертається до початкового стану, готового до нового пуску.

Типові вузли та схеми керування синхронним двигуном

Синхронні двигуни широко застосовуються у промисловості для приводу механізмів, які працюють зі сталою швидкістю — таких як компресори, насоси, вентилятори тощо. Завдяки розвитку напівпровідникової перетворювальної техніки з'явилася можливість створення керованих синхронних електроприводів із регульованими режимами роботи.

Попри певну конструктивну складність у порівнянні з асинхронними машинами, синхронні двигуни мають низку важливих переваг:

- здатність працювати з випереджальним коефіцієнтом потужності ($\cos\varphi > 1$), що дозволяє підвищити коефіцієнт потужності підприємства і зменшити потребу у компенсаційних пристроях;
- меншу чутливість до коливань напруги живлення;
- високу перевантажувальну здатність і стабільність швидкості обертання.
- Пуск синхронного двигуна може здійснюватися асинхронним способом — на повну або знижену напругу за допомогою реактора чи автотрансформатора.

На рис.4.15, а подано приклад схеми збудження синхронного двигуна з глухопідключеним збудником, яка відзначається простотою конструкції та може використовуватись у випадках, коли пускові струми не спричиняють надмірного падіння напруги в мережі. Така схема ефективна за умови, що статичний момент навантаження не перевищує $M_{stat} \leq 0{,}4\ M_{nom}$.

Під час асинхронного пуску статор двигуна під'єднується безпосередньо до мережі, а двигун розганяється як асинхронний — до швидкості, близької до синхронної. У цей період обмотка збудження замикається на розрядний опір (рис. 4.15, б), щоб запобігти виникненню перенапруг. Коли ротор досягає швидкості, близької до синхронної, спрацьовує контактор КМ, який від'єднує обмотку збудження від розрядного опору та підключає її до якоря збудника, після чого двигун переходить у синхронний режим.

У сучасних системах часто застосовуються також тиристорні схеми збудження, які дають змогу точно регулювати момент подачі збудження залежно від типу пуску — «легкого» або «важкого». У першому випадку збудження подається до моменту підключення статора на повну напругу, у другому — після цього моменту.

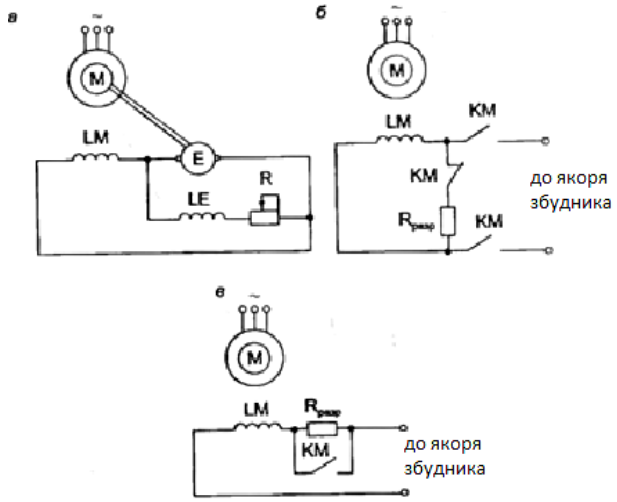


Рисунок 4.15 – Типові вузли схем збудження синхронного двигуна

Можливе підключення обмотки збудження двигуна до якоря збудника послідовно з розрядним опором (рис.4.15, в).

Процес автоматизації подачі збудження синхронного двигуна може здійснюватися двома способами — у функції швидкості або у функції струму.

На рис.4.16 показано схему, в якій збудження подається у функції швидкості обертання ротора. У ній використовується електромагнітне реле постійного струму КТ (іноді — реле часу з гільзою), котушка якого підключається через діод VD до розрядного опору $R_{розр}$.

Після підключення обмотки статора до мережі в обмотці збудження індукується ЕРС, а через котушку реле КТ проходить випрямлений пульсуючий струм, частота й амплітуда якого залежать від ковзання s.

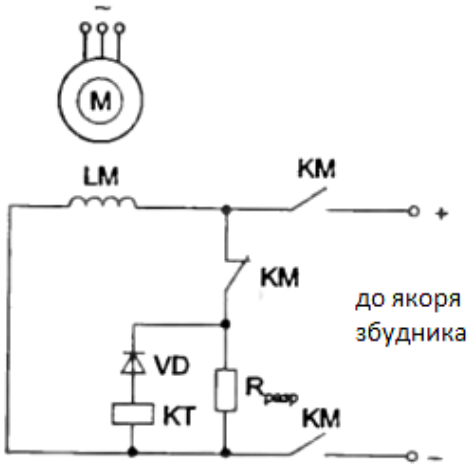


Рисунок 4.16 – Подача збудження на синхронний двигун в функції швидкості

При пуску, коли s = 1, струм має максимальне значення, а в міру розгону ротора інтервали між імпульсами збільшуються, і середнє значення магнітного потоку в реле зменшується.

Коли швидкість наближається до синхронної, магнітний потік у реле знижується до межі спрацьовування, реле КТ відпускає, замикаючи контакт у колі контактора КМ, який подає живлення на обмотку збудження. Таким чином, збудження автоматично вмикається саме в момент, коли ротор досягає синхронної швидкості.

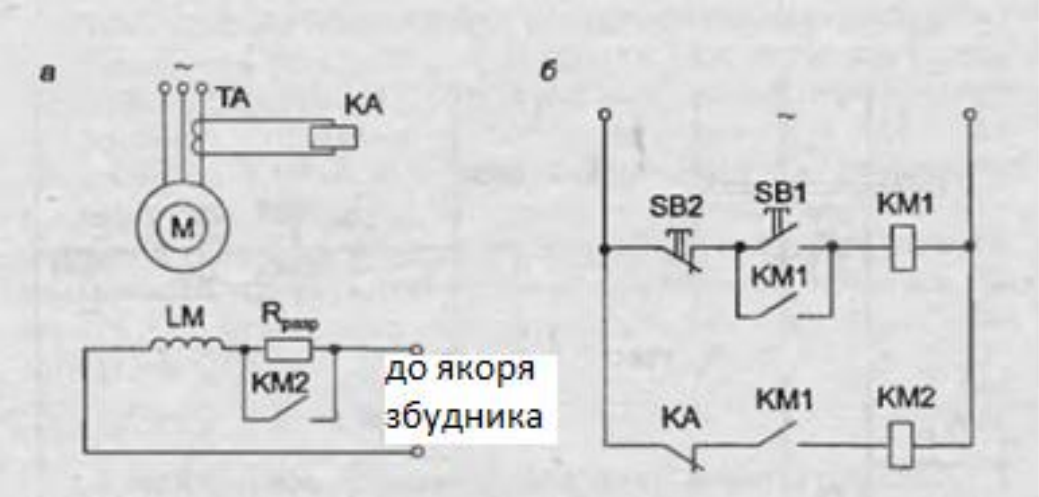


Рисунок 4.17 – Подача збудження на синхронний двигун в функції струму

На рис.4.17 показано схему подачі збудження синхронного двигуна у функції струму. Принцип її роботи ґрунтується на контролі пускового струму за допомогою реле струму КА.

Під час запуску двигуна через статор проходить великий пусковий струм, тому реле КА спрацьовує й розмикає свій контакт у колі контактора КМ2 (рис. 4.17, б), запобігаючи передчасному підключенню обмотки збудження. У процесі розгону двигуна струм зменшується; коли він досягає розрахункового мінімуму, реле КА відпускає, замикаючи контакт у колі КМ2. У результаті контактор КМ2 спрацьовує, замикає свій контакт у колі збудження та шунтує розрядний резистор $R_{розр}$, забезпечуючи подачу збудження.

Такий спосіб автоматизації дозволяє забезпечити плавний перехід від асинхронного пуску до синхронного режиму роботи, зберігаючи стабільність струму й моменту на валу двигуна.

Схема прямого пуску синхронного двигуна напругою до 1000 В

Асинхронний пуск синхронного двигуна здійснюється при включенні автоматичних вимикачів QF1, QF2 і спрацьовуванні контактора КМ3 (рис.4.18, а, б). При цьому реле форсировки КУ спрацьовує і замикає свої контакти, що призводить до спрацьовування контактора форсування КМ1. Контакт КМ1 розмикається, і в коло обмотки збудження вводиться резистор Rрозр. Чи включаються червона і зелена сигнальні лампи, що вказує на приєднання двигуна до мережі, але збудження ще не подано.

При пусковому струмі спрацьовує реле максимального струму КА. Своїм замикаючим контактом воно подає живлення реле часу КТ1. Кон-

такт КТ1 замикається, що призводить до спрацьовування реле часу КТ2, але контактор КМ2 не включений, оскільки контакт КТ1 розмикається, а контакт КТ2 замикається. При швидкості двигуна, близькою до синхронної, реле КА розмикає свій контакт в колі контактора КТ1; при цьому коло живлення контактора КМ2 виявиться замкнутої, так як контакт КТ2 розмикається з витримкою часу. Контактор КМ2 спрацьовує, шунтує розрядний резистор Rрозр в обмотці збудження і закорачує котушку реле КА. Котушка контактора КМ2 стає на саможивлення. Одночасно відключається зелена лампа. Пуск двигуна закінчений.

При зниженні напруги для збереження моменту двигуна застосовується форсування збудження при зниженні напруги реле форсировки КУ відпадає і розмикає свій контакт, що призводить до відключення контактора форсування КМ1. При цьому контакт КМ1 в колі збудження двигуна замикається і шунтує резистор Rрозр Це призводить до збільшення струму збудження двигуна, а отже, і до збереження моменту двигуна. Зупиніть двигун, натиснувши на кнопку SB2 «Стоп» - і відключенням автоматичних вимикачів QF1 і QF2.

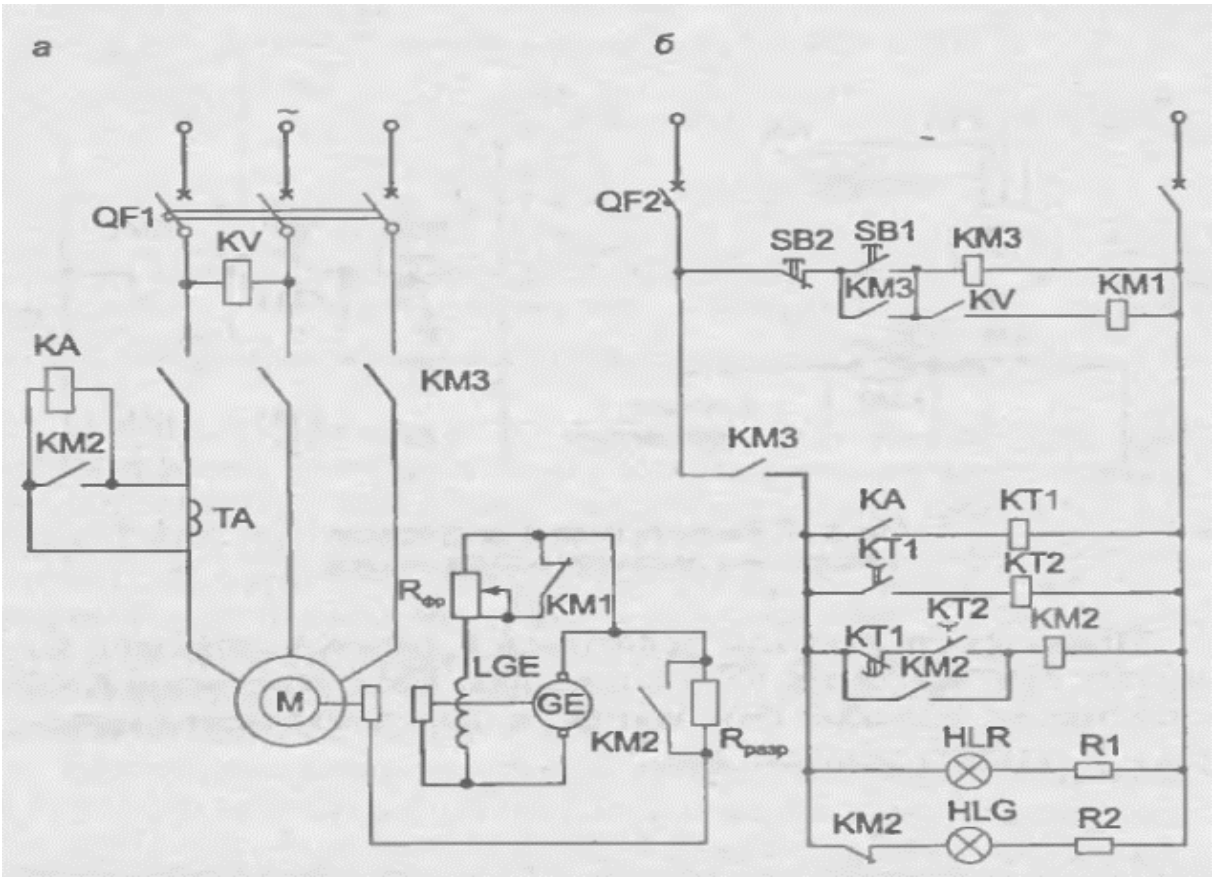


Рисунок 4.18 – Схема прямого пуску синхронного двигуна напругою до 1000 В

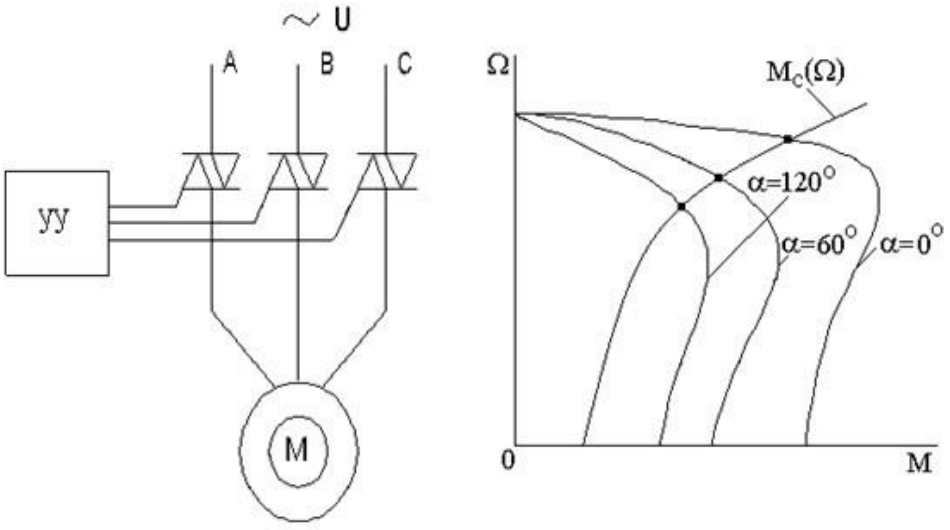
Регулювання швидкості за допомогою напівпровідниковими перетворювачами

Регулювання швидкості електродвигунів за допомогою напівпровідникових перетворювачів ґрунтується на використанні тиристорних або симісторних ключових елементів, що змінюють параметри напруги або частоти живлення. На рис.4.19, а подано схему асинхронного електропривода з тиристорним регулятором напруги (ТРН), установленим у колі статора.

Пара симісторів V1–V3 утворює трифазний двопівперіодний регулятор змінної напруги, керування яким здійснюється шляхом зміни кута керування α.

На рис.4.19, б показано відповідні механічні характеристики двигуна для різних значень кута α. Зі збільшенням цього кута напруга, що подається на статор, зменшується, унаслідок чого робоча частина характеристики стає більш пологою, а перевантажувальна здатність двигуна — нижчою.

Такі схеми доцільно застосовувати для механізмів вентиляторного типу, у яких момент опору пропорційний квадрату швидкості обертання. Незважаючи на обмежений діапазон регулювання, ТРН забезпечує плавну зміну швидкості й просту конструкцію системи керування.



а) б)

Рисунок 4.19 – Асинхронний електропривод з ТРН в колі статора : а - варіант принципової електричної схеми; б - механічні характеристики.

З тиристорним регулятором змінної напруги (ТРН) в колі статора асинхронного електродвигуна

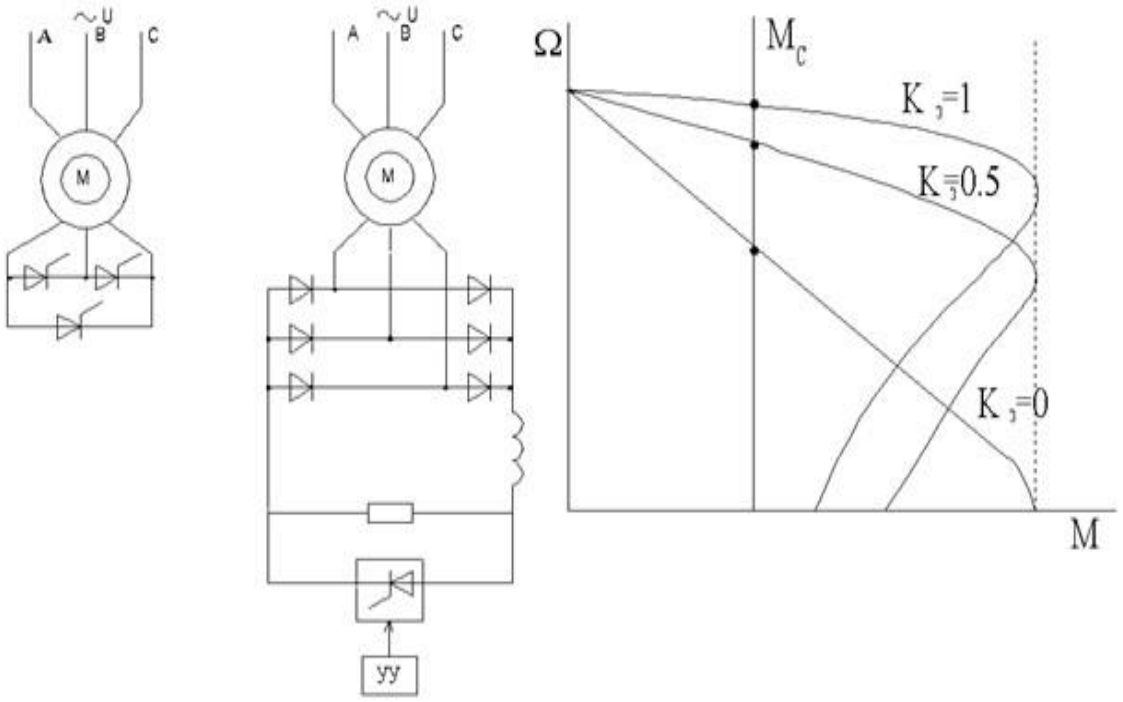
На рис.4.20 наведено варіанти схем асинхронного електропривода з тиристорними ключовими елементами в колі ротора. Регулювання

швидкості тут досягається шляхом зміни активного опору роторного кола за допомогою тиристорних регуляторів.

У схемі (рис. 4.20, а) використовується природна комутація, коли тиристор періодично переходить у вимкнений стан унаслідок зміни полярності струму. У варіанті (рис. 4.20, б) застосовується штучна комутація, що забезпечує примусове вимкнення тиристора незалежно від фази струму. У цьому випадку дросель L використовується для згладжування пульсацій струму в роторному колі.

На рис.4.20, в показано механічні характеристики двигуна при різних коефіцієнтах заповнення імпульсів. Зі зменшенням коефіцієнта заповнення характеристики стають більш м'якими, однак двигун зберігає здатність розвивати необхідний момент.

Регулювання швидкості в таких схемах супроводжується втратами енергії у резисторах, але воно забезпечує плавність зміни частоти обертання та добру стійкість у перехідних режимах, що особливо важливо для приводів із великим моментом інерції.



а) б) в)

а - з природною комутацією ; б - з штучною комутацією ; в - механічні характеристики

Рисунок 4.20 – Асинхронний електропривод з тиристорними ключовими елементами в колі ротора

З частотним регулюванням асинхронних і синхронних електродвигунів

Частотне регулювання швидкості асинхронних і синхронних електродвигунів є найефективнішим способом зміни частоти обертання, оскільки забезпечує високий коефіцієнт корисної дії та широкий діапазон ре-

гулювання. Принцип дії таких систем полягає у тому, що статор двигуна підключається до мережі через перетворювач частоти (ПЧ), який змінює мережеву частоту f_c на регульовану частоту $f_м$.

На рис.4.21 показано загальну схему підключення асинхронного двигуна через ПЧ. Залежно від конструкції розрізняють три типи частотних перетворювачів:

– безпосередні перетворювачі, у яких відсутня ланка постійного струму;

– перетворювачі з явно вираженою ланкою постійного струму, що складаються з керованого випрямляча й автономного інвертора;

– перетворювачі з неявно вираженою ланкою постійного струму, у яких частина елементів одночасно виконує функції випрямлення й інвертування.

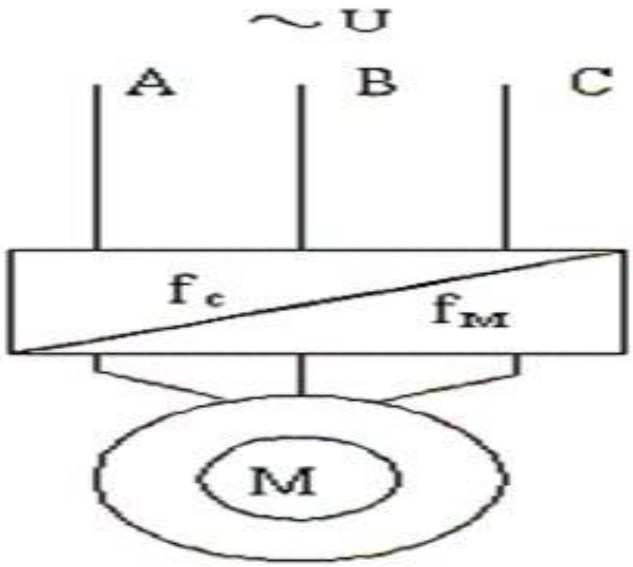
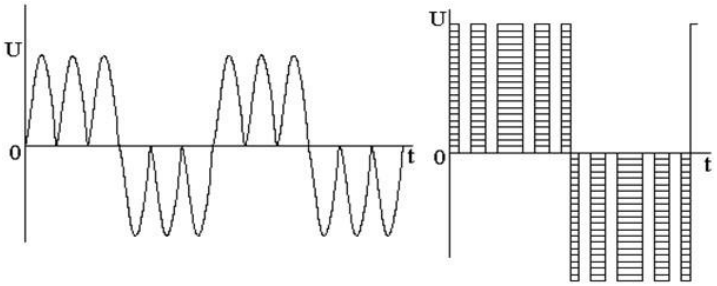


Рисунок 4.21 – Підключення асинхронного електродвигуна через перетворювач частоти.

У безпосередніх перетворювачах регулювання частоти здійснюється вниз від частоти мережі, а вихідна напруга має дискретну форму (рис. 4.22, а).

У перетворювачах з проміжною ланкою постійного струму напруга, що живить двигун, формується інвертором із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) (рис. 4.22, б), що дозволяє отримати практично синусоїдальну форму струму і значно зменшити вміст гармонік.



а) б)

Рисунок 4.22 – Форма напруги на одній з фаз статора : а - при живленні от непосредственного ПЧ; б - при живленні від ПЧ з проміжною ланкою постійного струму з широтно-імпульсною модуляцією.

Для забезпечення стабільної роботи електродвигуна при частотному регулюванні необхідно дотримуватись певного співвідношення між напругою живлення U_1 і частотою f_1. Це дозволяє підтримувати сталим магнітний потік у сталі машини, а отже — і обертовий момент.

При постійному моменті навантаження виконується співвідношення:

$$\frac{U_1}{f_1} = constf$$

тобто напруга живлення має змінюватися пропорційно частоті.

При постійному навантаженні за потужністю напруга змінюється пропорційно квадратному кореню з частоти:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const$$

а при вентиляторному типі навантаження, коли момент опору пропорційний квадрату швидкості, напруга повинна змінюватися пропорційно квадрату частоти:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = const$$

Таким чином, регулювання напруги узгоджується з характером навантаження, що дозволяє забезпечити оптимальний режим роботи двигуна в усьому діапазоні частот.

В інверторах з неявно вираженою ланкою постійного струму ряд силових елементів схеми поєднує функції випрямлення і інвертування напруги.

З вентильним перетворювачем в якірному колі електродвигуна постійного струму

- Вентильні електроприводи, що поєднують вентильний перетворювач і двигун постійного струму, широко застосовуються у промисловості завдяки можливості плавного, точного й економічного регулювання кутової швидкості в широкому діапазоні. У таких системах зміна швидкості здійснюється за рахунок регулювання напруги живлення якоря, яке формується випрямлячем.

Найпоширенішими є мостові схеми випрямлення (одно- і трифазні). Для спрощення конструкції та зниження вартості в нереверсивних системах часто застосовуються напівкеровані мости, у яких частину тиристорів замінено діодами.

- У реверсивних електроприводах зміна напрямку обертання здійснюється трьома способами:
- зміною напрямку струму в колі якоря за допомогою механічного або електронного реверсора — використовується у випадках, коли допустима коротка пауза (до 0,1–0,2 с) між реверсами;
- застосуванням двох вентильних груп з протилежною полярністю вихідної напруги (рис. 4.23), що забезпечує швидкодію і точність, необхідні для динамічних систем;
- зміною напрямку струму у колі збудження, що є простішим і дешевшим варіантом, проте має меншу швидкодію через значну електромагнітну постійну часу обмотки збудження (0,5–2,5 с).

Реверсивні вентильні перетворювачі можуть бути виконані у двох варіантах — однокомплектні (з контактним реверсом або на симетричних тиристорах) і двокомплектні (рис. 4.23).

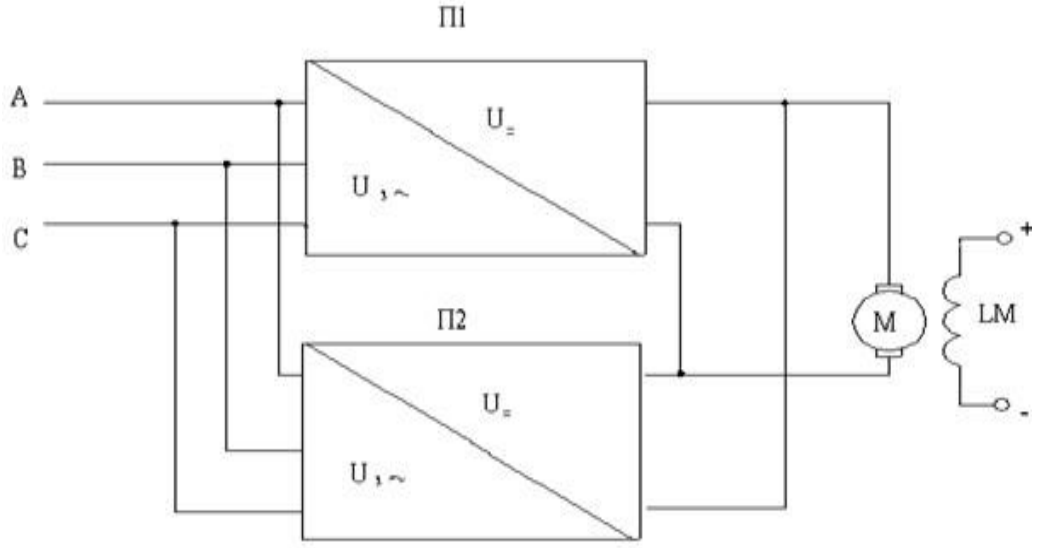


Рисунок 4.23 – Підключення двигуна постійного струму до двокомплектного випрямляча

У двокомплектних системах використовуються дві вентильні групи, які можуть працювати у режимах роздільного або спільного керування.

При роздільному керуванні імпульси відкривання подаються лише на вентилі однієї з груп — випрямної або інверторної. Перемикання між ними виконується в безструмову паузу, що фіксується датчиком струму, завдяки чому забезпечується плавний і безпечний перехід між напрямками обертання двигуна. У малопотужних приводах, з метою здешевлення, обидві групи можуть керуватися спільним імпульсно-фазовим пристроєм, який перемикає імпульси між групами за допомогою безконтактного комутатора.

При спільному керуванні імпульси подаються одночасно на обидві групи вентилів: одна з них працює у випрямному режимі, інша — в інверторному. У цьому випадку між групами виникає зрівняльний струм, який замикається всередині кола вентилів, оминаючи коло якоря двигуна. Для обмеження цього струму до безпечного рівня (приблизно 0,1 $I_{ном}$) у схемі використовується реактор (дросель) із відповідним індуктивним опором.

У сучасних реверсивних системах перевага надається однокомплектним перетворювачам із контактним реверсом або двокомплектним зі схемою роздільного керування, які забезпечують високу швидкодію, стабільність і безпечну експлуатацію. Спільне керування застосовується переважно у спеціалізованих приводах, що працюють у зоні малих навантажень із частими реверсами струму в колі якоря.

Висновки.

Для двигунів постійного струму характерні прості методи регулювання — зміною напруги живлення, струму збудження або опору в колі якоря. Вони забезпечують широкий діапазон регулювання швидкості, але поступаються за надійністю і простотою асинхронним приводам.

Асинхронні двигуни завдяки використанню частотних перетворювачів і тиристорних регуляторів дозволяють реалізувати економічне, плавне й енергоефективне керування швидкістю без значних втрат у силових колах.

Синхронні електроприводи забезпечують високу стабільність швидкості, добрий коефіцієнт потужності та надійність роботи в умовах сталого навантаження.

Сучасний розвиток напівпровідникової техніки дав змогу створити інтегровані системи керування, у яких пуск, гальмування, реверс і регулювання швидкості виконуються автоматично, з використанням мікропроцесорних контролерів і перетворювачів частоти. Це підвищує ефективність роботи електроприводів, знижує енергоспоживання й забезпечує можливість точного керування процесами у промислових установках.

Контрольні питання.

1. Які основні принципи регулювання швидкості двигунів постійного та змінного струму?
2. Які функції виконують релейно-контакторні схеми в системах керування ДПС?
3. Чим відрізняються схеми пуску у функції швидкості, струму та часу?
4. У чому полягає принцип динамічного гальмування ДПС?
5. Як реалізується реверсування асинхронного двигуна?
6. Які переваги й недоліки схем керування АД з фазним ротором?
7. Як здійснюється збудження синхронного двигуна у функції швидкості або струму?
8. Які типи перетворювачів частоти використовують у сучасних приводах?
9. Як формується співвідношення U/f=constU/f = constU/f=const у частотному регулюванні?
10. Які переваги частотного регулювання порівняно з напівпровідниковими регуляторами напруги?
11. У чому полягає принцип роботи вентильного електропривода?
12. Які вимоги висуваються до технічного обслуговування приводів зі змінною швидкістю?
13. Як запобігають перегріванню пускових резисторів у схемах ДПС?
14. Які основні режими гальмування використовуються в електроприводах?
15. Як змінюються механічні характеристики АД при зміні кута керування α у тиристорних регуляторах?

Використана література.

1. Циганов О. М., Мардзявко В. А., Руденко А. Ю. Монтаж, наладка і експлуатація електрообладнання : конспект лекцій. Миколаїв, 2022, 160 с.
2. Василега П. О. Електропривод робочих машин : підручник. Суми : Сумський державний університет, 2022. 290 с.
3. Theodore Wildi. Electrical Machines, Drives, and Power Systems (updated 6-th edition). Pearson, 2023. 2261 p.

ТЕМА 5. СИЛОВІ ТРАНСФОРМАТОРИ: БУДОВА, ПРИНЦИП РОБОТИ, ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ. ТИПОВІ ДЕФЕКТИ ТА МЕТОДИ РЕМОНТУ

Будова силових трансформаторів. Робочі режими та типові несправності. Методи діагностики (випробування ізоляції, вимірювання втрат). Особливості ремонту й обслуговування.

Загальні відомості.

Силовий трансформатор (рис. 5.1) являє собою статичний електромагнітний пристрій, який має дві або більше обмоток і призначений для перетворення параметрів електричної енергії змінного струму за допомогою явища електромагнітної індукції.

У його обмотках здійснюється передача енергії між колами різної напруги та сили струму при незмінній частоті. Трансформатор може бути використаний не лише для перетворення рівнів напруги, але й для зміни кількості фаз, а також форми вихідної напруги, що визначається його конструктивними особливостями.

Електрична енергія, що виробляється на електростанціях, має напругу, як правило, від 6 до 30 кВ, тоді як для передавання її на значні відстані застосовуються мережі з напругою 220 – 1150 кВ.

Тому на кожній електростанції встановлюються підвищувальні трансформатори, які збільшують напругу до необхідного рівня для магістральних ліній електропередачі.

У системах розподілу електроенергії між промисловими підприємствами, міськими і сільськими споживачами застосовуються понижувальні трансформатори, які зменшують напругу до рівня 110, 220, 380 В; 6, 10, 20 або 35 кВ.

Безпосередньо біля споживачів установлюються трансформаторні підстанції, що забезпечують живлення більшості електроприймачів, які працюють при напругах 220 В, 380 В та 660 В.

Рисунок 5.1 - Трифазний силовий трансформатор

Таким чином, електрична енергія на своєму шляху від генератора до кінцевого споживача багаторазово проходить процес трансформації, що забезпечує мінімальні втрати потужності та раціональне використання електричної енергії. На кожний кіловольт-ампер встановленої генераторної потужності припадає 7 - 8 кВА трансформаторної потужності.

Класифікація трансформаторів.

Трансформатори поділяються за різними ознаками, які визначають їх призначення, конструкцію, принцип роботи, умови експлуатації та спосіб охолодження. Така класифікація дає можливість вибрати оптимальний тип трансформатора для конкретної енергетичної або технологічної системи.

1. За призначенням

- Силові трансформатори — використовуються для перетворення напруги в системах передавання та розподілу електричної енергії. Вони є основною ланкою енергосистем, забезпечуючи узгодження рівнів напруги між електростанціями, підстанціями та споживачами.
- Вимірювальні трансформатори — призначені для зниження високих напруг і струмів до безпечних значень, необхідних для живлення вимірювальних приладів, реле захисту й систем автоматики. Поділяються на *трансформатори струму* (ТС) і *трансформатори напруги* (ТН).
- Спеціальні трансформатори — застосовуються для специфічних технологічних процесів: *зварювальні*, *печні*, *випробувальні*, *імпульсні*, *лабораторні*, *ізолюючі*, *автотрансформатори* тощо.

2. За кількістю фаз

- Однофазні трансформатори — мають одну магнітну систему та використовуються переважно в побутових мережах, допоміжних електронних пристроях і лабораторному обладнанні.
- Трифазні трансформатори — складаються з трьох однофазних систем, об’єднаних у спільний магнітопровід. Такі трансформатори найбільш поширені в промислових мережах змінного струму, оскільки забезпечують симетричне навантаження по фазах і менші втрати матеріалів.

3. За конструкцією магнітопроводу

- Стержневі — обмотки розміщені на двох або трьох стержнях магнітопроводу, а ярма з’єднують ці стержні у замкнений магнітний контур. Така конструкція має менші втрати холостого ходу й спрощене охолодження.
- Броньові — обмотки оточені ярмами магнітопроводу, що зменшує розсіювання потоку і підвищує електромагнітну стійкість. Використовуються в трансформаторах середньої та великої потужності.
- Тороїдальні — мають кільцевий магнітопровід без ярм; характеризуються високим ККД і низьким рівнем магнітного шуму, однак складні у виготовленні.

4. За способом охолодження

- Сухі трансформатори — обмотки не занурені в рідину, охолодження здійснюється природною або примусовою циркуляцією повітря. Використовуються в закритих приміщеннях, адміністративних і громадських будівлях.
- Масляні трансформатори — обмотки й магнітопровід занурені в трансформаторне масло, яке виконує функції охолодження та електричної ізоляції. Залежно від типу охолодження розрізняють:
  - природна циркуляція масла і повітря;
  - природна циркуляція масла, примусове повітряне охолодження;
  - примусова циркуляція масла і водяного теплоносія.
  - Масляні трансформатори переважають у енергетичних системах завдяки високій надійності та можливості роботи при великих потужностях.

5. За місцем установки

- Внутрішньої установки — розташовуються в спеціальних закритих приміщеннях (трансформаторних або розподільчих підстанціях).
- Зовнішньої установки — експлуатуються на відкритому повітрі, мають герметичну конструкцію, підвищений ступінь ізоляції та захист від атмосферних впливів (IP54–IP65).

6. За способом з’єднання обмоток

У трифазних трансформаторах обмотки можуть бути з’єднані за схемами зірка (Y), трикутник (Δ) або зигзаг (Z).

Взаємне розташування фаз первинної та вторинної обмоток визначає векторну групу трансформатора (наприклад, *Dyn11*, *Yyn0*), яка вказує на фазовий зсув між системами напруги. Правильний вибір векторної групи забезпечує сумісність трансформаторів у паралельній роботі.

7. За способом регулювання напруги

- Без регулювання (нерегульовані) — забезпечують фіксоване співвідношення напруг між обмотками.
- З перемикачами відпаєк без навантаження — дозволяють змінювати коефіцієнт трансформації при знеструмленому трансформаторі.
- З перемикачами під навантаженням — дають змогу регулювати напругу в робочому режимі, підтримуючи стабільність напруги в мережі.

8. За рівнем потужності та напруги

- Малі (до 10 кВА, до 1 кВ) — для місцевого живлення або електроніки;
- Середні (10–1000 кВА, до 35 кВ) — для промислових мереж;
- Великі (понад 1000 кВА, 35–750 кВ і вище) — для магістральних енергосистем.

Основні параметри трансформатора.

Кожний трансформатор обладнано табличкою номінальних даних, на якій зазначаються:

1) вид трансформатора - трансформатор, автотрансформатор і т.ін.;

2) кількість фаз мережі, до якої увімкнуто трансформатор, m . На сьогодні здебільшого використовуються трифазні та однофазні транс- форматори;

3) номінальна потужність трансформатора S_N у кіловольт-амперах (кВА) - повна потужність, на яку розраховано трансформатор за умовами нагрівання та безаварійної роботи упродовж усього строку служби;

4) номінальна частота f_N у герцах (Гц) - промислова частота 50 Гц, в спеціальних установках - до 400 Гц, можливо проектування трансформаторів на частоту 60 Гц;

5) номінальні напруги обмоток вищої напруги (ВН) та нижчої напруги (НН) U_{hN}/U_{lN} у кіловольтах (кВ). Номінальна напруга обмотки ВН визначається діючим значенням номінальної лінійної напруги на затискачах обмотки в колі з більшою напругою. Номінальна напруга об- мотки НН визначається діючим значенням номінальної лінійної напруги на затискачах обмотки в колі з меншою напругою при неробочому ході. Першою завжди пишеться величина для обмотки ВН, другою - для обмотки НН. Для однофазних трансформаторів номінальні напруги визначаються фазними напругами;

б) номінальні струми обмоток ВН та НН I_{hN}/I_{lN}в амперах (А) - номінальні лінійні струми обмоток ВН та НН, що визначаються діючими значеннями, на які розраховано трансформатор за умовами нагрівання та безаварійної роботи упродовж усього строку служби. Першою завжди пишеться величина для обмотки ВН, другою - для обмотки НН. Для однофазних трансформаторів номінальні струми визначаються фазними струмами;

7) умовні позначення схем та груп з'єднання обмоток. Наприклад, для трифазних трансформаторів $Y/Y\text{o} - 0$, $Y/\Delta - 11$. Першою завжди пишеться схема з'єднань обмотки ВН, другою - обмотки НН. Числом від 0 до 11 позначається група з'єднань обмоток трансформатора. Для одно- фазних трансформаторів існує тільки одна група з'єднань - I/I-0;

8) напруга короткого замикання u_k у відсотках(%) - напруга на затискачах первинної обмотки при замкнений накоротко вторинній при номінальних струмах в обмотках, виражена у відсотках до номінальної первинної напруги;

9) умовне позначення способу системи охолодження;

10) повна маса у кілограмах (кг);

11) маса ізоляційного масла у кілограмах (кг);

Крім того, в технічних умовах на трансформатор мають бути зазначені:

втрати неробочого ходу P_0 у ватах (Вт) - втрати потужності в магнітопроводі трансформатора при номінальній напрузі первинної обмотки;

втрати короткого замикання P_{kN} у ватах (Вт) - втрати потужності в обмотках трансформатора при номінальних струмах в обмотках;

струм неробочого ходу i_0 у відсотках (%) - струм первинної обмотки в режимі неробочого ходу при номінальній напрузі, виражається у відсотках до номінального струму первинної обмотки;

номінальний ККД η_N, у відносних одиницях (в.о.) або у відсотках (%) (може бути відсутнім) - ККД, визначений для номінального режиму, тобто при номінальних напругах та струмах трансформатора.

Принцип дії трансформатора

Теорія трансформаторів розглядається на прикладі найпростішого трансформатора, який являє собою однофазний двообмотковий двострижневий трансформатор (рис. 5.2).

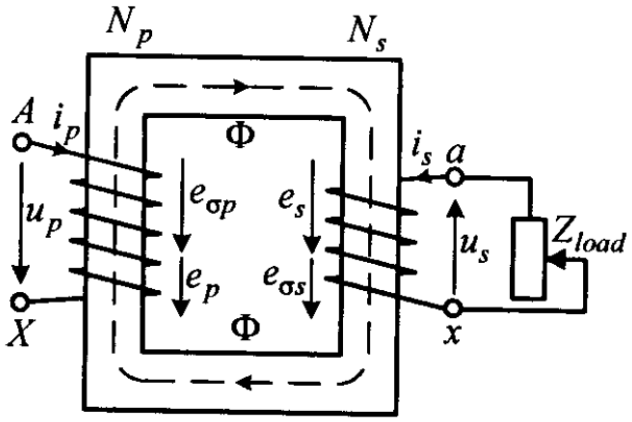


Рисунок 5.2 - Електромагнітна схема найпростішого трансформатора

Однофазний двообмотковий трансформатор складається з замкненого феромагнітного осердя (магнітопроводу) та двох обмоток (когушок), розташованих на ньому та зчеплених з єдиним магнітним потоком Φ.

Використання феромагнітного замкненого осердя істотно зменшує магнітний опір на шляху магнітного потоку та зменшує його розсіювання. Феромагнітне осердя виконується шихтованим (складеним із окремих тонких пластин). Це необхідно для зменшення магнітних втрат від змінного магнітного потоку.

Обмотка, яка приєднується до джерела змінного струму, називається первинною обмоткою. Величини, що стосуються первинної обмотки, мають індекс p (primary). Обмотка, до якої приєднується навантаження, називається вторинною обмоткою. Величини, що стосуються вторинної обмотки, мають індекс s (secondary).

Первинна обмотка AX з кількістю витків N_{P} приєднується до мережі змінного струму частотою f з напругою u_p. До затискувачів вто- ринної обмотки ax з кількістю витків N_s, приєднується навантаження з повним опором Z_{load} . У первинній обмотці протікає змінний струм i_p, що у магнітопроводі створює змінний магнітний потік Φ , напрямок якого для кожного моменту часу визначається за правилом свердлика (правого гвинта). Відповідно до закону електромагнітної індукції магнітний потік Φ індукує в обмотках ЕРС первинної та вторинної обмоток відповідно

$$e_p = -N_p \frac{d\Phi}{dt};$$
$$e_s = -N_s \frac{d\Phi}{dt}.$$

Якщо вторинну обмотку замкнути на опір навантаження Z_{load}, то під впливом ЕРС e_s, у колі вторинної обмотки протікатиме змінний струм i_s, а на затискачах вторинної обмотки ax установиться змінна напруга u_s. Напруга u_s, за своєю сутністю є спадом напруги на опорі Z_{load}.

Таким чином, електрична енергія з мережі передається до навантаження зі змінюванням величини напруги на опорі навантаження.

Характер змінювання струмів в обмотках, магнітного потоку, ЕРС, вторинної напруги визначається характером змінювання первинної напруги. Якщо вона змінюється за синусоїдним законом, то інші величини будуть змінюватися за тим самим законом, але з різними початковими фазами.

При синусоїдному змінюванні величин миттєвим значенням ЕРС e , напруги u та струму i відповідають їх діючі значення ЕРС E, напруги U та струму I відповідно.

Коефіцієнт трансформації

Найважливіший параметр трансформатора - це коефіцієнт трансформації, який визначається за формулою:

$$n = \frac{E_h}{E_l} = \frac{N_h}{N_l}.$$

Величини, що стосуються обмотки вищої напруги мають індекс h (high), а величини, що стосуються обмотки нижчої напруги - індекс l (low).

Для інженерних розрахунків, зважаючи на малість спаду напруги на активних та індуктивних опорах обмоток трансформатора, можна вважати, що коефіцієнт трансформації

$$n \approx \frac{E_h}{E_l} \approx \frac{U_h}{U_l}.$$

Якщо $N_p > N_s$, то $U_p > U_s$. У цьому випадку трансформатор називається знижувальним. Якщо $N_p < N_s$, то $U_p < U_s$.. У цьому випадку трансформатор називається підвищувальним.

Будь-який силовий трансформатор можна застосовувати і як підвищувальний, і як знижувальний.

ККД трансформаторів становить 0,95-0,99 (більші значення відповідають трансформаторам більшої потужності), тобто втрати потужності в трансформаторах малі, і ними можна знехтувати. Тому можна вважати, що повні потужності первинної та вторинної обмоток однакові:

$$S_p = S_s \quad \text{, або} \quad U_p I_p = U_s I_s.$$

Отже

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{I_p}{I_s}.$$

Для знижувального трансформатора в скільки разів зменшується напруга вторинної обмотки, у стільки ж разів підвищується струм на виході, для підвищувального трансформатора навпаки - в скільки разів збільшується напруга вторинної обмотки, у стільки ж разів знижується струм на виході.

Конструкція трансформаторів

Магнітопроводи трансформаторів будь-якого призначення та потужності завжди виконуються шихтованими з електротехнічної сталі товщиною 0,35 або 0,28 мм.

Конструкція магнітопроводів трансформатора визначається його призначенням та потужністю. За конструкцією магнітопроводу транс- форматори поділяються на стрижневі; броньові; бронестрижневі; торої- дальні. Для однофазних трансформаторів малої потужності використовують стрижневі, броньові та тороїдальні магнітопроводи; середньої потужності - стрижневі; великої потужності - стрижневі та бронестрижневі.

Частина магнітопроводу, на якій розташовано обмотки, називається стрижнем. Ділянки магнітопроводу, що з'єднують між собою стрижні називаються ярмами (рис. 5.3). Проходження магнітного потоку Ф по магнітопроводу за- звичай позначається пунктирною лінією посередині поперечного перерізу елемента магнітопроводу.

В броньових магнітопроводах (рис. 5.4) ширина середнього стрижня виконується в 2 рази більшою за ширину бокових стрижнів. Цей тип магнітопроводу має розгалужене ярмо, що прикриває (бронює) обмотки. Така конструкція дозволяє зменшити вдвічі величину магнітного потоку Ф, який проходить по ярмах та по бокових стрижнях.

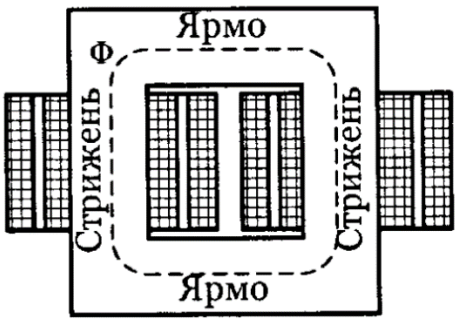


Рисунок 5.3 - Стрижневий магнітопровід однофазного трансформатора

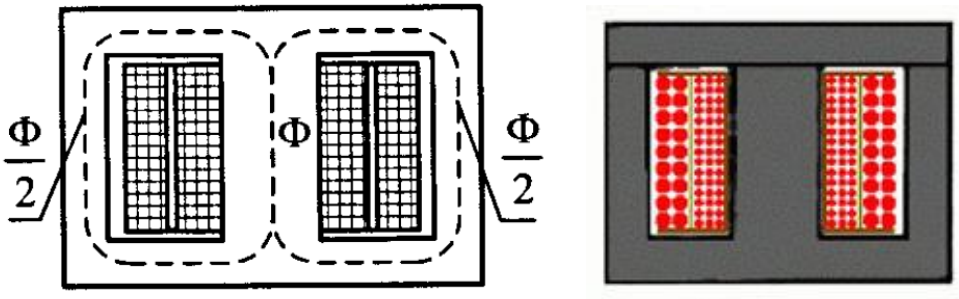


Рисунок 5.4 – Броньовий магнітопровід однофазного трансформатора

Тороїдальний магнітопровід (рис. 5.5) має форму тора. Магнітний потік Ф проходить по колу магнітопроводу. Обмотки рівномірно розташовується по всьому колу стрижня.

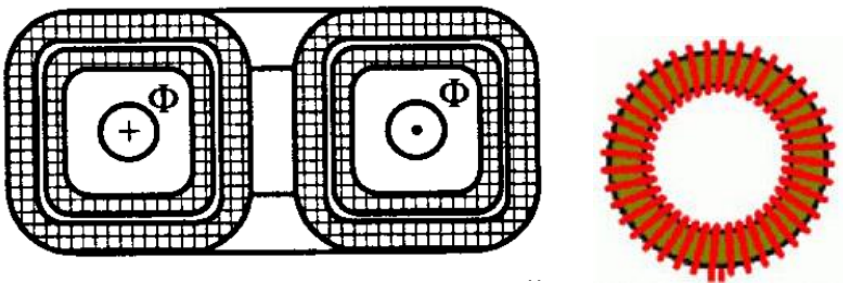


Рисунок 5.5 - Тороїдальний магнітопровід однофазного трансформатора

Бронестрижневий трансформатор (рис. 5.6) має магнітопровід із розгалуженими ярмами. Метою використання цієї конструкції *є* зни ження габаритної висоти h_1. Якщо трансформатор має велику потужність, то при транспортуванні залізницею висота є обмежуючим розміром (висота просвігу залізничних мостів). Порівняно зі стрижневим магнітопроводом висотою h_2, висота бронестрижневого трансформатора h_1 менша на ширину середніх стрижнів a .

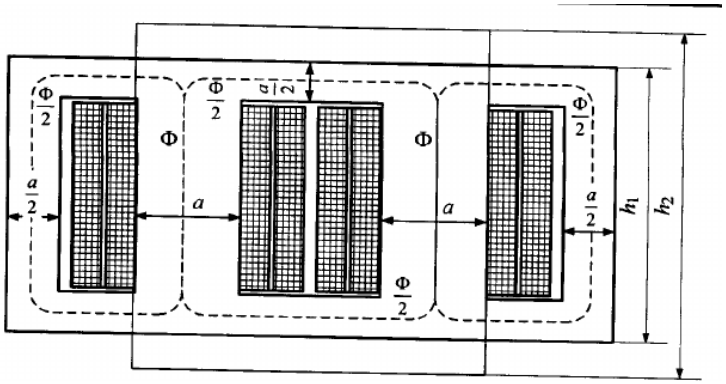


Рисунок 5.6 - Бронестрижневий магнітопровід однофазного трансформатора

Для трифазних трансформаторів малої та середньої погужності використовують плоскі тристрижневі магнітопроводи. На одному стрижні розміщуються обмотки вищої та нижчої напруг відповідних фаз. Така конструкція проста, але плоский магнітопровід магнітно несиметричний. Тому пере- важно застосовують просторові три стрижневі магнітопроводи.

Для трифазних трансформаторів великої потужності використовують стрижневий або плоский бронестрижневий магнітопровід (зменшення габаритної висоти).

Для дуже потужних трифазних трансформаторів магнітопроводи виконують із трьох окремих однофазних стрижневих магнітопроводів. У цьому випадку трифазний трансформатор називається трансформаторною групою.

За способом шихтування (складання магнітопроводу з окремих тонких листів) магнітопроводи поділяються на стикові та шихтовані «внапусток».

У стикових магнітопроводів (рис. 5.7) стрижні та ярма збираються окремо і з'єднуються разом за допомогою конструкційних деталей. Недоліками цієї конструкції є мала механічна міцність і неминучі технологічні повітряні зазори у стиках ярем та стрижнів. Перевагою цієї конструкції є простота посадки обмоток на стрижні. Після посадки на стрижні об- моток нижчої та вищої напруг за допомогою скоб, кожухів, шпильок стрижні та ярма збираються разом.

У магнітопроводах, що шихтовані «внапусток», розташування листів у сусідніх шарах змінюється (рис. 5.8). До переваг цієї конструкції належать висока механічна міцність та зменшення повітряних технологічних зазорів. Недоліком є необхідність розшихтовування верхнього ярма для посадки обмоток на стрижні. Це є трудомісткою технологічною операцією.

Поперечні перерізи стрижнів та ярем для трансформаторів малої потуж- ності мають форму прямокутника (рис. 5.9, а) або квадрата (рис. 5.9, б), для трансформаторів середньої та великої по тужності форму східчастої фігури, що вписана у коло, (рис. 5.9 в). При східчастій фо-

рмі краще використовується внутрішній об'єм обмотки: зростає площа поперечного перерізу активної сталі та з'являється можливість пропустити більший магнітний потік. Форма поперечного пере- різу ярма така сама, як і стрижнів. Однак, поперечний переріз ярма трифазних трансформаторів приблизно на 5 % більший за переріз стрижня. Це робиться для зменшення впливу магнітної несиметрії .

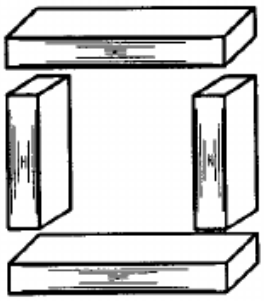


Рисунок 5.7 - Стиковий магнітопровід

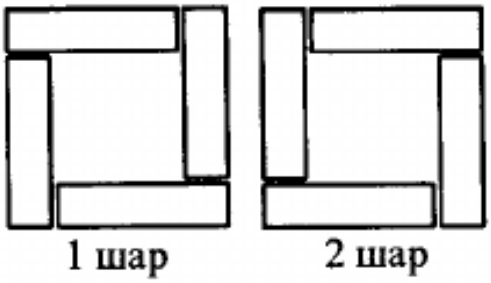


Рисунок 5.8 – Розташування листів магнітопроводу в сусідніх шарах при шихтуванні «внапусток»

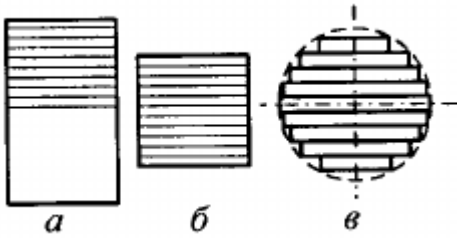


Рисунок 5.9 - Поперечні перерізи стрижнів та ярем магнітопроводів прямокутної (а); квадратної (б) та східчастої (в) форм

Для поліпшення охолодження в магнітопроводі можуть виконуватися поздовжні та поперечні канали.

Листи пакета стрижнів скріплюються за допомогою скло бандажа, який накладається на їхню поверхню. Листи пакетів ярем скріплюються за допомогою яремних балок. Яремні балки верхнього та нижнього ярем скріплюються за допомогою шпильок за межами магнітопроводу.

Обмотки трансформаторів

Обмотки трансформаторів повинні відповідати таким технічним вимогам:

- забезпечувати необхідну електричну міцність та механічну стійкість при коротких замиканнях;
- мати мінімальні втрати потужності у провідниках;
- забезпечувати рівномірне нагрівання та ефективне охолодження;

- бути стійкими до вібрацій, дії електродинамічних і термічних навантажень.

Обмотки виготовляються переважно з міді або алюмінію:

- Мідні обмотки мають менший опір і вищу механічну міцність, що забезпечує менші втрати та компактність конструкції.
- Алюмінієві обмотки легші, дешевші, але потребують більшого перерізу провідників для тієї ж потужності.

Провідники ізолюються за допомогою емалевого покриття, просоченого паперу або склотканини. Для підвищення надійності в потужних трансформаторах застосовують транспозицію провідників (СТС-шини), що зменшує втрати від вихрових струмів.

За способом розташування обмотки вищої та нижчої напруг бувають концентричними (рис. 5.10) та переміжними (рис. 5.11).

Концентричні обмотки (рис. 5.10) виконуються у вигляді циліндрів, що одягаються на стрижень магнітопроводу один поверх одного. Ближче до стрижня розташовується обмотка нижчої напруги для більш легкого ізолювання. Ізоляційні відстані між обмоткою нижчої напруги та заземленим магнітопроводом, між обмотками нижчої та вищої напруг, між обмотками та ярмом визначаються номінальними напругами потужністю трансформатора та способом охолодження.

Переміжні обмотки (див. рис. 5.11) використовуються тільки для спеціальних трансформаторів. Обмотки нижчої та вищої напруг виконуються у вигляді окремих котушок, що почергово насаджуються на стрижень.

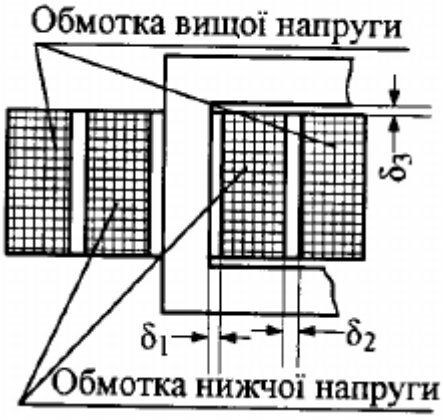


Рисунок 5.10 - Стрижень та ярма трансформатора з концентричними обмотками

Рисунок 5.11 - Стрижень та ярма трансформатора з переміжними обмотками

За способом намотування обмотки поділяються на такі типи:

циліндричні обмотки (рис. 5.12), виготовляються з ізольованого круглого або прямокутного проводу; застосовуються в однофазних і трифазних трансформаторах середньої потужності;

гвинтові обмотки (рис. 5.13), ормуються із широкої стрічки або багатожильного провідника, розташованого спіраллю; придатні для великих струмів та високих електродинамічних навантажень.

спіральні безперервні обмотки (рис. 5.14), складаються з ряду плоских дисків, з'єднаних послідовно або паралельно; відзначаються добрим охолодженням і механічною міцністю, використовуються у потужних трансформаторах.

Ізоляція обмоток виконується з матеріалів, стійких до високої температури, електричних напруг та механічних впливів.

Типові ізоляційні матеріали:

- електрокартон, пресований папір, лакотканина, склотканина, термостійкі полімери;
- у масляних трансформаторах — просочений папір у поєднанні з трансформаторним маслом.

Для зменшення впливу електромагнітних полів між обмотками встановлюють електростатичні екрани. Додатковий захист забезпечують запобіжники, реле контролю температури й охолодження.

Системи охолодження трансформаторів

У трансформаторах використовується повітряне та масляне охолодження.

Повітряні трансформатори установлюють в житлових і виробничих помешканнях, де знаходяться люди. Масляні трансформатори застосовуються на відкритому повітрі або в приміщеннях за відсутності людей, тому що трансформаторне масло легкозаймисте та токсичне.

У масляних трансформаторах (рис. 4.15) магнітопровід з обмотками повністю розташовується в баці , який заповнений трансформаторною оливою. Електрична міцність трансформаторного масла істотно вища за електричну міцність повітря, тому можна зменшити ізоляційні проміжки та габарити трансформатора. Теплопровідність трансформаторного масла в багато разів більша за повітря. Отже, збільшується відведення тепла від активних частин магнітопроводу, підвищується густина струму в обмотках, зменшуються габарити трансформатора та витрати активних матеріалів. Для збільшення поверхні охолодження бак виконується оребреним або облаштовується трубами та навісними охолоджувачами. На верхній кришці бака розташовуються виведення обмоток вищої та нижчої напруг , розширювальний бачок і захисна апаратура.

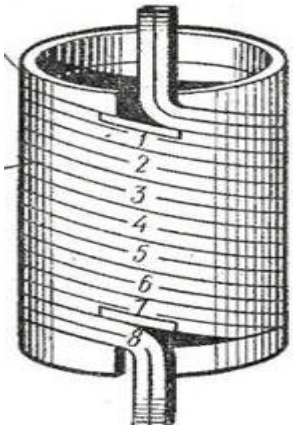


Рисунок 5.12 - Циліндрична обмотка трансформатора

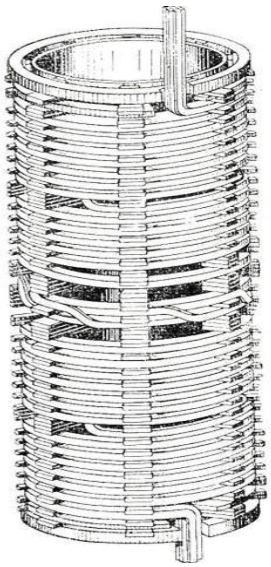


Рисунок 5.13 - Гвинтова обмотка трансформатора

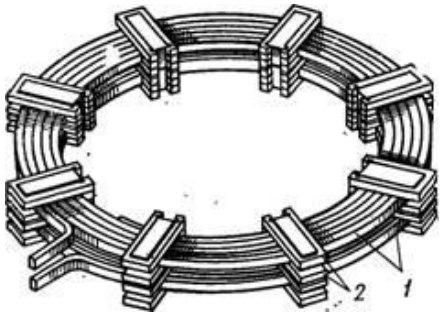


Рисунок 5.14 - Диск - спіральної обмотки трансформатора

www.elektro.zavod.com.ua тел.(044)500-98-87

Рисунок 5.15 - Трифазний силовий трансформатор із масляним охолодженням

Робочі режими трансформатора

Силовий трансформатор у процесі експлуатації може працювати в різних режимах, які визначаються навантаженням, напругою, температурними умовами та характеристиками мережі. Основними є такі режими:

Номінальний режим. Трансформатор працює при номінальній напрузі, струмі та частоті. Температура обмоток не перевищує допустимих значень, втрати потужності стабільні, рівень шуму — у межах норми. Цей режим є еталонним для оцінювання технічного стану.

Режим холостого ходу. До первинної обмотки подається номінальна напруга, вторинна — розімкнена. Через обмотку проходить струм холостого ходу I_0, який створює магнітний потік Φ у сердечнику. У цьому

режимі виникають втрати в сталі — на гістерезис і вихрові струми, а також часткові втрати в обмотках.

$$\mathrm{P_0} = \mathrm{P_{Fe}} + \mathrm{P_{Cu0}}$$

де P_{Fe} — втрати в сталі; P_{Cu0} — втрати в міді при холостому ході.

Режим короткого замикання. Вторинна обмотка з'єднана через навантаження з малою опором або короткозамкнена, а на первинну подається знижена напруга, за якої номінальний струм проходить через обмотки. У цьому режимі визначають втрати короткого замикання:

$$P_k = I_n^2 \cdot R_{eq}$$

де R_{eq} — приведений активний опір обмоток.

Режим використовується під час випробувань, а також може виникнути аварійно при пошкодженні ізоляції або помилках в колах навантаження.

Перевантаження. Виникає при тривалій роботі з навантаженням, більшим за номінальне. Це спричиняє перегрів обмоток, старіння ізоляції та підвищення втрат у міді. Короткочасне перевантаження допустиме в аварійних умовах, але тривале призводить до пошкодження трансформатора.

Асиметричне навантаження. При нерівномірному розподілі фазних струмів виникають додаткові втрати та нагрівання. Особливо небезпечна поява струмів нульової послідовності у трифазних трансформаторах з'єднаних у схему з виведеним нейтральним проводом.

Робота при зниженій або підвищеній напрузі

- Зниження напруги на первинній обмотці веде до зменшення напруги на вторинній стороні, що впливає на роботу споживачів.
- Підвищення напруги може спричинити перенапруження ізоляції та прискорене старіння обмоток.
- Для компенсації цих впливів застосовують перемикачі відпаєк обмоток (РПН/ПБВ).

Пусковий та аварійний режими. Під час увімкнення трансформатора спостерігається струм намагнічування, який у декілька разів перевищує номінальний. При короткому замиканні або пробої ізоляції трансформатор миттєво відключається захистом — струм у ланцюзі різко зростає, а енергія дуги може пошкодити обмотки.

Типові несправності силових трансформаторів

Несправності виникають унаслідок старіння матеріалів, механічних впливів, перевантажень, коротких замикань або порушень режимів охолодження. Їх поділяють на електричні, механічні та теплові.

Пошкодження ізоляції обмоток

- Причини: вологість, старіння, перенапруга, перегрів.
- Ознаки: зниження опору ізоляції, витік струму на корпус, спрацювання диференційного захисту.
- Методи діагностики: вимірювання опору ізоляції мегомметром, тангенса кута діелектричних втрат (tan δ), проведення випробувань підвищеною напругою.

Міжвиткові замикання

- Наслідки: локальний перегрів, збільшення струму, зниження коефіцієнта трансформації.
- Виявляється методом вимірювання струмів і напруг у фазах, аналізом гармонік, вимірюванням опору обмоток.

Пробій між обмотками або на корпус

- Супроводжується спрацьовуванням релейного захисту, різким падінням напруги, пошкодженням масла.
- Діагностика: випробування ізоляції, газовий аналіз масла (ДГА), перевірка на наявність часткових розрядів.

Перегрів активної частини

- Причини: перевантаження, забруднення або несправність системи охолодження, висока температура навколишнього середовища.
- Діагностика: температурний контроль, термометри, термосигналізатори, тепловізійне обстеження.

Пошкодження магнітопроводу

- Може бути викликане механічними ударами, вібрацією або короткими замиканнями.
- Симптоми: підвищений шум, збільшення втрат холостого ходу.
- Виявляється за допомогою віброаналізу, вимірювання втрат холостого ходу та струму намагнічування.

Дефекти у вводах і контактних з’єднаннях

- Окиснення, ослаблення болтових з’єднань, корозія.
- Призводить до підвищення температури, іскріння, локального перегріву.
- Контроль: перевірка контактів, термографічний контроль.

Порушення герметичності бака та системи охолодження

- Витік масла, потрапляння вологи й повітря в бак.
- Наслідки: зниження діелектричних властивостей масла, прискорене старіння ізоляції.
- Виявлення: огляд, перевірка рівня масла, газоаналіз, контроль вологості.

Забруднення або старіння трансформаторного масла

- Зниження діелектричної міцності, збільшення втрат і утворення газів.
- Діагностика: хімічний аналіз, визначення пробивної напруги, вмісту газів і вологи.

Методи діагностики силових трансформаторів (випробування ізоляції, вимірювання втрат)

Діагностика силових трансформаторів є основним інструментом оцінювання їхнього технічного стану без розбирання. Метою діагностичних випробувань є виявлення дефектів ізоляції, контактних з'єднань, магнітопроводу, системи охолодження та активної частини, що можуть призвести до аварій чи зниження ефективності роботи обладнання.

Методи діагностики поділяються на електричні, теплові, хімічні та візуально-акустичні.

1. Електричні методи діагностики

Вимірювання опору ізоляції

Це базовий метод контролю стану ізоляційних систем обмоток, вводів та конструктивних елементів трансформатора. Вимірювання здійснюється мегомметром при напрузі 1000–2500 В.

Показники:

- Опір ізоляції між обмотками та корпусом $R_{\text{із}}$;
- Коефіцієнт абсорбції K_a:

$$K_a = \frac{R_{60}}{R_{15}}$$

де R_{60} — опір через 60 с, R_{15} — через 15 с після прикладання напруги.

Якщо $K_a < 1{,}3$, це вказує на вологу або забруднення ізоляції.

Випробування ізоляції підвищеною напругою

Проводиться для перевірки електричної міцності ізоляції після ремонту чи тривалого простою. До обмоток подається випробувальна напруга, що перевищує номінальну у 1,5–3 рази, протягом 1 хвилини.

Випробування вважається успішним, якщо не відбувається пробою або часткових розрядів.

Визначення тангенса кута діелектричних втрат (tan δ)

Показник $\tan\delta$ характеризує втрати енергії в ізоляції. Зі старінням або зволоженням ізоляції $\tan\delta$ збільшується.

$$\tan\delta = \frac{P_{\text{втрат}}}{\omega W}$$

де $P_{\text{втрат}}$ — потужність втрат у ізоляції,

W — запасена енергія, ω — кутова частота мережі.

Норматив**:** для трансформаторів напругою до 35 кВ допустиме значення $\tan\delta \leq 1{,}0\%$.

Вимірювання проводять мостами Шеринга або спеціалізованими приладами.

Вимірювання опору обмоток постійному струму

Дозволяє оцінити стан пайок, контактів і рівномірність навивки. Використовується мікроомметр, опір вимірюється для кожної фази. Відхилення більше ніж на 2–3 % між фазами свідчить про дефект або міжвиткове замикання.

Вимірювання коефіцієнта трансформації (Кт)

Проводиться для перевірки відповідності фактичного коефіцієнта трансформації паспортному:

$$K_t = \frac{U_1}{U_2}$$

Відхилення понад 0,5 % вказує на пошкодження обмотки або порушення відпайок.

Визначення втрат холостого ходу і короткого замикання

Ці параметри характеризують стан магнітопроводу і обмоток.

Втрати холостого ходу:

$$P_0 = P_{Fe} + P_{Cu0}$$

визначаються при номінальній напрузі на первинній обмотці при розімкненій вторинній. Збільшення P_0 свідчить про дефекти магнітопроводу, замикання пластин сталі або зниження якості збирання.

Втрати короткого замикання:

$$P_k = I_n^2 R_{eq}$$

визначаються при короткозамкненій вторинній обмотці та зниженій напрузі. Зростання P_k — ознака міжвиткових замикань або поганих контактів.

Визначення струму холостого ходу

Вимірюється амперметром у режимі холостого ходу.

Підвищення цього струму на 20–40 % свідчить про дефекти магнітопроводу або насичення сталі.

2. Теплові методи діагностики

Термометричний контроль

Температура обмоток та масла вимірюється за допомогою вбудованих термометрів або термопар. Перевищення допустимих температур (наприклад, понад +95 °C для обмоток) сигналізує про перевантаження або зниження ефективності охолодження.

Тепловізійна діагностика

Безконтактний метод контролю з використанням тепловізора. Дає змогу виявити:

- перегрів контактних з'єднань;
- дефекти охолоджувальної системи;
- асиметрію навантаження.

Тепловізійне обстеження є обов'язковим при плановому технічному обслуговуванні.

3. Хімічні методи діагностики

Дає змогу оцінити стан ізоляції та виявити дефекти активної частини.

Проводяться такі випробування:

– Визначення пробивної напруги масла;

– Визначення вмісту вологи (метод Карла Фішера);

– Газовий хроматографічний аналіз (ДГА) — основний метод виявлення часткових розрядів, перегріву, пробою ізоляції.

Таблиця 5.1 - Типові гази та їхнє походження

Газ	**Причина утворення**	**Характер дефекту**
H_2	Часткові розряди	Початкове пошкодження ізоляції
CH_4, C_2H_6	Перегрів обмоток	Неправильне навантаження
C_2H_2	Електрична дуга	Пробій ізоляції
CO, CO_2	Термічне руйнування целюлози	Старіння паперової ізоляції

4. Візуально-акустичні методи

– Огляд баку, вводів, охолоджувальних труб: шукають сліди протікання масла, корозію, механічні пошкодження.

– Прослуховування корпусу: зміна шуму може свідчити про розбалансування магнітопроводу або вібрацію обмоток.

– Перевірка дії релейного захисту (Бухгольц-реле): спрацювання сигналу вказує на внутрішні газові виділення через перегрів або пробій.

Особливості ремонту й обслуговування силових трансформаторів

Ремонт і технічне обслуговування силових трансформаторів спрямовані на підтримання їх у працездатному стані, продовження терміну служби та запобігання аваріям. Ефективність ремонту залежить від своєчасної діагностики, правильної організації технічного догляду та якісного виконання ремонтних операцій.

Ремонт трансформаторів виконується відповідно до "Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів" (ПТЕЕС) та ДСТУ EN 60076 (серія стандартів на силові трансформатори).

1. Види технічного обслуговування

Технічне обслуговування (ТО) включає **комплекс операцій**, які проводяться для забезпечення нормальної роботи трансформатора між ремонтами.

Залежно від періодичності, розрізняють:

Оглядове обслуговування (ТО-1). Проводиться під час чергування або за графіком (1–2 рази на місяць).

Основні операції:

- перевірка рівня масла в розширювачі та баці;
- огляд баку, вводів, охолоджувальних труб, контактів;
- контроль температури обмоток і масла;
- перевірка дії сигналізації, вентиляторів, насосів;
- прослуховування шумів трансформатора.

Періодичне обслуговування (ТО-2). Виконується раз на рік або за графіком ППР (планово-попереджувальних ремонтів).

Включає:

- очищення ізоляторів і корпусу;
- контроль ізоляції мегомметром;
- термографічне обстеження;
- аналіз трансформаторного масла;
- перевірку дії Бухгольц-реле та захисних пристроїв;
- підтяжку контактних з’єднань.

Позачергове обслуговування. Проводиться після коротких замикань, перевантажень, грозових перенапруг або аварійних сигналів.

Метою є оперативне виявлення пошкодження без розбирання.

2. Класифікація ремонтів

Таблиця 5.2- Обсяг та складність ремонтних робіт

Вид ремонту	Характер робіт	Періодичність
Поточний	Усунення незначних дефектів без демонтажу активної частини (заміна ущільнень, вводів, доливка масла, ремонт РПН).	1 раз на 2–3 роки
Середній	Часткове розбирання, перевірка активної частини, просушування ізоляції, ремонт контактів, очищення магнітопроводу.	1 раз на 5–7 років
Капітальний	Повне розбирання, відновлення або заміна обмоток, регенерація масла, випробування всіх вузлів.	1 раз на 10–15 років або за результатами діагностики

Періодичність ремонтів уточнюється за станом обладнання, яке визначають за результатами випробувань та експлуатаційних показників.

3. Основні етапи ремонту силового трансформатора

Підготовчий етап

- відключення від мережі, розрядження обмоток;
- злив масла у резервуари;
- очищення зовнішніх поверхонь;
- оформлення допуску на роботи.

Розбирання та дефектація

- демонтаж вводів, розширювача, кришки;
- зняття активної частини (для середнього/капітального ремонту);
- візуальний огляд обмоток, магнітопроводу, перевірка стану ізоляції;
- складання дефектної відомості.

Ремонтно-відновлювальні операції

- просушування активної частини у вакуумній або термічній сушильній камері;
- заміна обмоток або часткове перемотування;
- ремонт або заміна вводів і контактних з’єднань;
- очищення й фарбування бака, ущільнення фланців;
- регенерація масла (фільтрація, дегазація, осушування).

Складання та заливка масла

- збирання трансформатора у зворотному порядку;
- вакуумування бака для видалення повітря;
- заливка підготовленого масла з вологістю не більше 10 ppm;
- герметизація системи.

Випробування після ремонту.

Включають:

- вимірювання опору ізоляції;
- визначення коефіцієнта трансформації;
- перевірку втрат холостого ходу й короткого замикання;
- випробування підвищеною напругою;
- контроль герметичності та роботи охолодження.

4. Особливості обслуговування трансформаторного масла

Масло виконує **подвійну функцію** — електричної ізоляції й охолодження. Його якість безпосередньо впливає на ресурс обладнання.

– Масло повинно мати високу пробивну напругу (не менше 30 кВ/2,5 мм), низький вміст води (≤ 0,001 %) та кислотне число ≤ 0,1 мг КОН/г.

– При зниженні параметрів проводиться фільтрація, дегазація або повна заміна.

– Періодично (раз на 12–24 місяці) виконують аналіз на газовий склад (ДГА) для контролю процесів старіння.

5. Контроль якості ремонтних робіт

Після ремонту трансформатор повинен пройти повний цикл контрольно-випробувальних процедур.

Таблиця 5.3 – Критерії перевірки якості

Параметр	**Норма / Метод контролю**
Опір ізоляції	Не нижче паспортного значення
Випробування підвищеною напругою	Без пробою протягом 1 хв
Тангенс кута діелектричних втрат	≤ 1,0 %
Втрати холостого ходу	Не більше ніж на 10 % вище номінальних
Рівень шуму	Не перевищує допустимих значень
Герметичність	Витоки масла відсутні протягом 24 годин випробування

6. Вимоги безпеки під час ремонту

– Усі роботи виконуються **при повному знятті напруги** й за наявності **заземлення**.

– Заборонено виконувати ремонт під напругою або за наявності газів у баку.

– Злив масла проводиться лише у металеві резервуари, що мають заземлення.

– При роботі з вакуумними установками дотримуються вимог щодо герметичності й захисту від опіків гарячим маслом.

7. Рекомендації щодо продовження ресурсу трансформатора

– Регулярне проведення діагностики (раз на рік або за графіком ППР);

– Контроль температури та навантаження за допомогою термосигналізаторів;

– Підтримання оптимального рівня масла та сухості ізоляції;

– Використання **систем моніторингу стану (on-line DGA, температурні сенсори, віброконтроль)**;

– Дотримання умов охолодження та вентиляції приміщення трансформаторної підстанції.

Висновки.

1. Силовий трансформатор є ключовою ланкою енергосистеми, яка забезпечує передавання електричної енергії з мінімальними втратами між різними рівнями напруги.

2. Основними типами трансформаторів є підвищувальні, понижувальні, вимірювальні та спеціальні — їх вибір залежить від призначення, потужності, умов роботи та системи охолодження.

3. Принцип дії ґрунтується на явищі електромагнітної індукції: зміна магнітного потоку у феромагнітному осерді індукує ЕРС у вторинній обмотці, що забезпечує перетворення напруги без зміни частоти.

4. Конструкція трансформатора (магнітопровід, обмотки, система охолодження, ізоляція) визначає його технічні характеристики, надійність та енергоефективність.

5. У процесі роботи трансформатор проходить різні режими — номінальний, холостого ходу, короткого замикання, перевантаження, асиметричного навантаження тощо. Відхилення від нормальних умов призводять до збільшення втрат і старіння ізоляції.

6. Найбільш поширеними несправностями є: пошкодження ізоляції обмоток, міжвиткові замикання, пробій між обмотками, перегрів активної частини, дефекти контактів і вводів, порушення герметичності бака та старіння трансформаторного масла.

7. Діагностика трансформаторів здійснюється комплексно:

8. електричними методами (опір ізоляції, tan δ, втрати, опір обмоток);

9. тепловими (термометрія, тепловізія);

10. хімічними (аналіз масла, газовий аналіз ДГА);

11. візуально-акустичними (огляд, прослуховування, контроль Бухгольц-реле).

12. Ремонт і технічне обслуговування виконуються за системою планово-попереджувальних робіт (ТО-1, ТО-2, позачергове обслуговування) і поділяються на поточний, середній та капітальний ремонт.

13. Якість ремонту перевіряється випробуваннями підвищеною напругою, вимірюванням втрат, опору ізоляції, герметичності та шуму.

14. Дотримання правил експлуатації, своєчасна діагностика і регенерація масла забезпечують довговічність, енергоефективність і безпеку роботи трансформаторів у промислових мережах.

Контрольні питання.

1. Яке призначення силових трансформаторів у системах електропостачання?

2. У чому полягає принцип дії трансформатора?

3. Які основні типи та класифікаційні ознаки силових трансформаторів?

4. Що таке коефіцієнт трансформації та від чого він залежить?

5. Як змінюються струми і напруги у первинній і вторинній обмотках при підвищувальному та понижувальному режимах?

6. Які основні конструктивні частини силового трансформатора та їх функції?

7. Які режими роботи трансформатора є основними?

8. У чому полягає різниця між режимами холостого ходу та короткого замикання?

9. Які фактори можуть спричинити перевантаження або асиметрію навантаження?

10. Назвіть типові несправності силових трансформаторів та основні ознаки їх прояву.

11. Які електричні методи використовують для діагностики трансформаторів?

12. Як проводиться вимірювання опору ізоляції та коефіцієнта абсорбції?

13. У чому полягає метод вимірювання втрат холостого ходу та короткого замикання?

14. Яке призначення має аналіз газів у трансформаторному маслі (ДГА)?

15. Які існують види технічного обслуговування силових трансформаторів і в чому полягає кожен із них?

16. Чим відрізняються поточний, середній і капітальний ремонти?

17. Які операції виконують під час капітального ремонту трансформатора?

18. Які показники перевіряють після завершення ремонту?

19. Які основні вимоги безпеки необхідно дотримуватись при ремонті трансформаторів?

20. Які заходи дозволяють продовжити термін служби силових трансформаторів?

Використана література.

1. Гайденко Ю.А. Електричні машини. Курс лекцій : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.

2. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М.О. Осташевський, О.Ю. Юр’єва; за ред. В.І. Мілих. Харків : ФОП Панов А.М., 2018. 452 с.

ТЕМА 6. КАБЕЛЬНІ ЛІНІЇ 0,4–10 КВ: КОНСТРУКЦІЯ, МЕТОДИ ПРОКЛАДАННЯ, ДІАГНОСТИКА ПОШКОДЖЕНЬ, ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТ

Конструкція та класифікація кабелів. Методи прокладання. Пошкодження та їхні причини. Випробування й діагностика стану ізоляції. Методи ремонту та відновлення працездатності.

Конструктивне виконання електричних мереж промислових підприємств

При прокладанні мереж застосовують електричні проводи, кабелі, шинопроводи та струмопроводи.

У нормальних приміщеннях при невеликих силових навантаженнях і напругою не вище за 380 В для освітлювальних мереж використовують плоскі проводи з пластмасовою оболонкою (ППВ, АППВ, ППВС, АПН, ППН, АППВС), які кріплять до стін або стель будівель цвяхами. Прокладка здійснюється по горючим і негорючим основам. Коли горючі основи не штукатурені, під проводи підкладають листовий азбест або склотканину. Проводи можна прокладати на ізолюючих опорах, на роликах, ізоляторах, клицях (рис. 6.1).

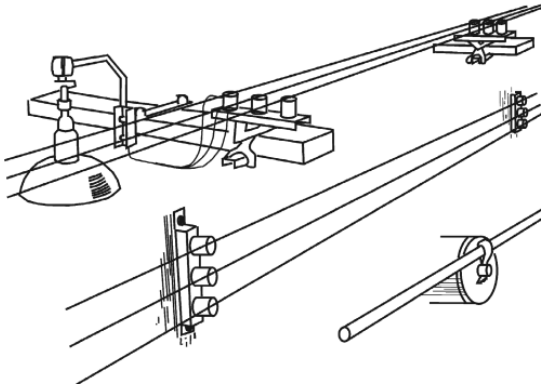


Рисунок 6.1 - Прокладка проводів на ізоляторах.

Ця електропроводка трудомістка, недовговічна, її монтаж мало піддається індустріальним методам, тому вона використовується рідко (особливо електропроводка на роликах).

Легкі неброньовані кабелі з гумовою та пластмасовою ізоляцією прокладають по поверхні стін і стель на струнах. Для їхнього кріплення використовують скоби, які кріплять шурупами та розпірними дюбелями, чи іншими способами (рис. 6.2). Для з'єднання або відгалуження ка-белів застосовують спеціальні відгалужувальні коробки.

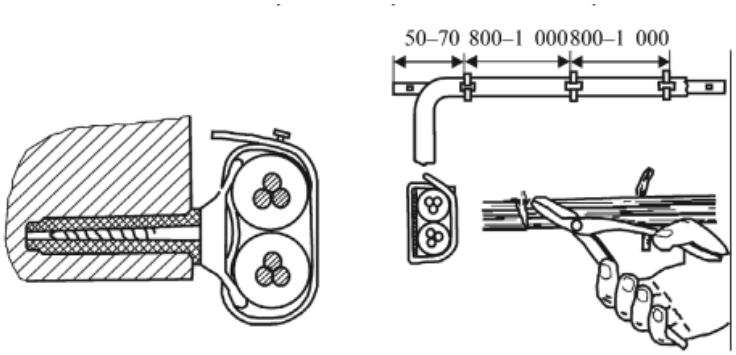
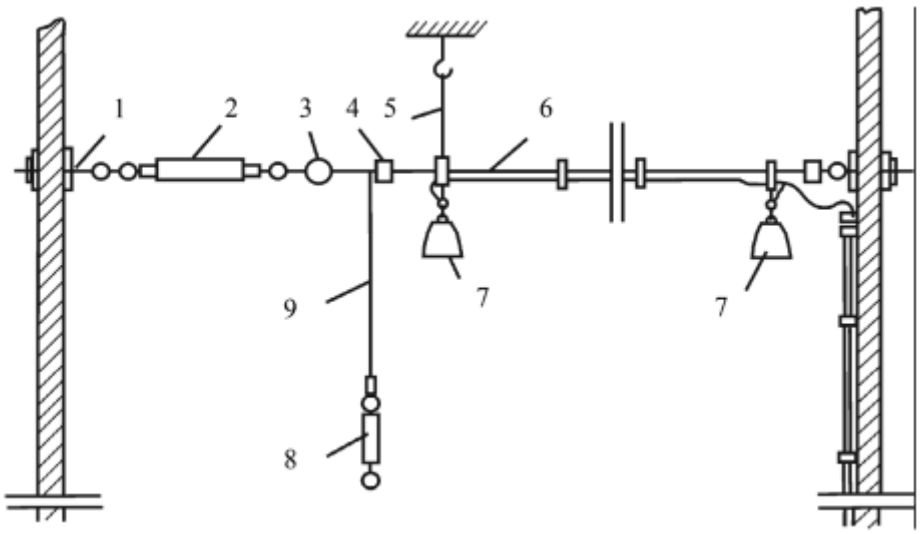


Рисунок 6.2 – Прокладка кабелів на будівельних конструкціях

Струнні електропроводки застосовують всередині та зовні для магістральних, розподільчих і групових ліній в освітлювальних і силових мережах напругою до 380 В змінного струму. Проводи та кабелі в струнних проводках підвішують до стального дроту-струни, який приєднують впритул до будівельної основи або виступів будівельних конструкцій кінцевими або проміжними кріпленнями. Діаметр несучої струни залежить від її довжини, перерізу та кількості закріплених на ній жил проводів і кабелів. При перерізі жил 10-16 мм^2 рекомендований діаметр струни 4 мм, найбільша відстань між анкерними кріпленнями 60 м (рис. 6.3).



1 - анкерне кільцеве кріплення, 2 поліспаст, 3 динамометр, 4 клиновий зажим, 5- вертикальна тросова підвіска, 6 комплект тросової підвіски, 7 світильник.

Рисунок 6.3 - Тросова електропроводка

Широкого застосування набув спосіб прокладки небронькованих кабелів по дроту з кріпленням бандажними пряжками.

Тросові електропроводки застосовують для освітлювальних і силових мереж. При наявності в цеху мостового крана тросові проводки можуть бути застосовані для мережі загального освітлення, якщо вони розташовані у вільному просторі між нижнім поясом ферм і мостом крана (рис. 6.3).

За способом виконання розрізняють такі види тросових електропроводок: з кріпленням проводів і кабелів безпосередньо до троса;

на тросових підвісках; на підвішених до троса конструкціях з ізоляторами або клицями; з прокладкою проводів у коробах, лотках, трубах і на рейках, що підвішені до троса.

Найбільш досконалими є тросові електропроводки, що виконані спеціальними тросовими проводами марки АРТ і АВТ, які мають власний несучий трос.

Прокладка проводів і кабелів на лотках і в коробах застосовується в будь-яких приміщеннях за умови прокладки проводів і кабелів в освітлювальних і силових мережах. Лотки прокладають по стінах, колонах, під площадками, перекриттям у приміщеннях і цехах, де допускається відкрита прокладка проводів і кабелів. Лотки випускають у вигляді готових для складання елементів, які дозволяють виконати трасу з необхідними поворотами і розгалуженнями в горизонтальній та вертикальній площинах.

Лоток не захищає прокладені в ньому проводи та кабелі від зовнішніх механічних пошкоджень. Він виготовляється з негорючих матеріалів і може бути суцільним, перфорованим або решітчастим (рис. 6.4). Лотки розташовують на висоті не менш ніж 2 м від рівня підлоги або майданчика обслуговування.

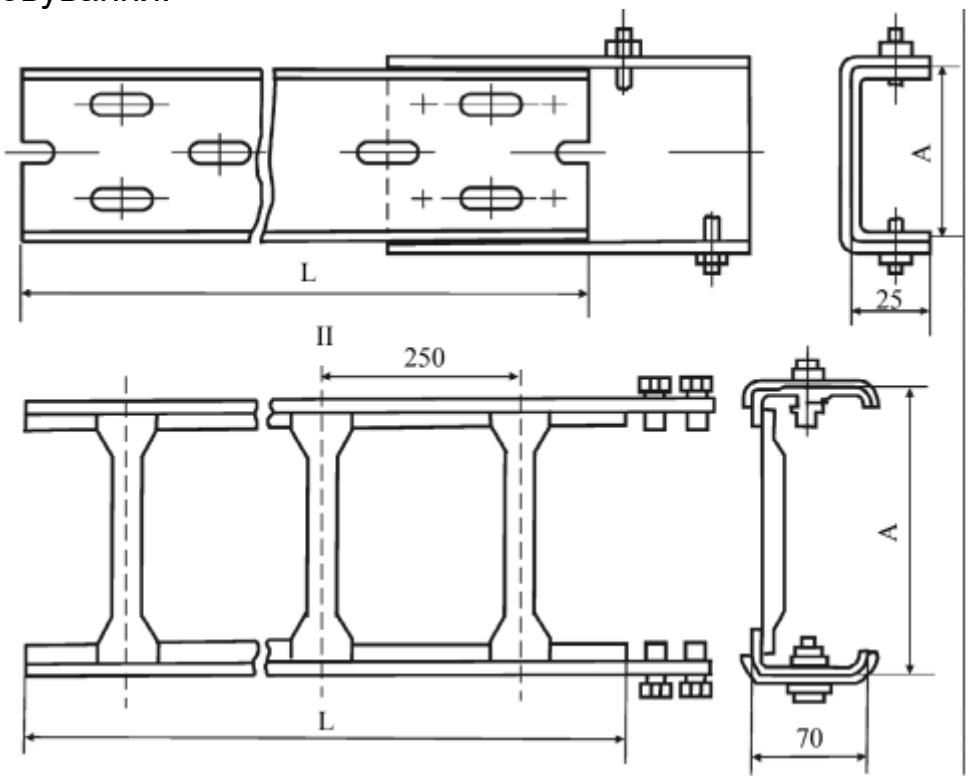


Рисунок 6.4 - Лотки для прокладки проводів та кабелів

Короби застосовують у цехах з великою кількістю дрібних електроприймачів, які потребують розгалужених розподільчих мереж.

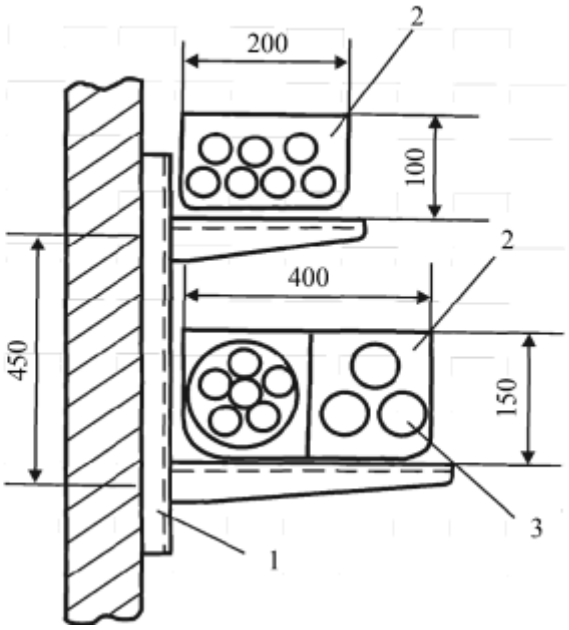
Коробом називається закрита порожня конструкція прямокутного або іншого перерізу, призначена для прокладки в ній проводів і кабелів.

Короб захищає прокладені в ньому проводи та кабелі від механічних пошкоджень.

Короби можуть бути глухими або з кришками. Глухі короби мають тільки суцільні стінки з усіх боків і не мають кришок.

Випускають короби у вигляді комплекту готових для складання елементів. Це прямі, хрестоподібні, трійникові або кутові для повороту траси в різноманітних площинах та ін. Елементи короба забезпечують про-кладку траси з необхідними поворотами та розгалуженнями в горизонтальній та вертикальній площинах. Довжина прямої секції короба дорівнює двом або трьом метрам.

У коробах прокладаються, як правило, проводи та кабелі перерізом до 16 мм^2 в один два ряди з відстанню між ними 5 мм. Допускається прокладка проводів і кабелів пучками на відстані між ними 20 мм. Всередині коробів відгалуження можуть бути виконані за допомогою стискачів у пластмасовій оболонці (рис. 6.5).



1 - настінна конструкція, 2 - короб, 3 - кабель.

Рисунок 6.5 - Прокладка проводів та кабелів у коробах

Короби зручні в експлуатації, добре піддаються методам індустріалізації.

Застосування лотків і коробів дозволяє значно скоротити витрати труб для електропроводок і зменшити трудомісткість монтажних робіт.

Прокладка проводів у трубах застосовується в будь-яких приміщеннях. Це найбільш надійна і в той же час найбільш трудомістка та дорога електропроводка. Для її виконання застосовують стальні та пластмасові труби.

Звичайні стальні водогазопровідні та легкі водогазопровідні (з умовним проходом 20-50 мм) труби допускається застосовувати в пожежоне-

безпечних та вибухонебезпечних зонах. Тонкостінні електрозварні труби не допускається застосовувати у вибухонебезпечних зонах.

Проводи закладають у повністю змонтовані труби з протяжними коробками, заздалегідь надівши на кінці труб пластмасові втулки для захисту ізоляції проводів при протягненні проводів. Для збереження ізоляції від пошкоджень необхідно правильно вибрати діаметр труби, який залежить від діаметра та якості проводів, конфігурації трубопроводу, його довжини і наявності на ньому вигинів.

Кріплення стальних труб при відкритій прокладці здійснюється скобами різної конфігурації.

Ділянки електропроводок, як правило, виконують з наборів блоків, прямих ділянок труб у комплекті і фасонними відводами, кутами та необхідними деталями для з'єднання та кріплення.

У приладобудівній промисловості, харчовій, медпрепаратів та інших для живлення електроприймачів невеликої потужності, змонтованих рядами, застосовують модульні мережі, тобто прокладку проводів у стальних трубах в підлозі. Така мережа забезпечує електроживленням технологічне обладнання, яке треба часто замінювати або переміщати у виробничих приміщеннях з нормальним навколишнім середовищем. Електроживлення здійснюється завдяки рівномірному розміщенню в підлозі цеху спеціальних відгалужувальних модульних коробок з визначеним кроком модулем або розподільчих колонок, до яких приєднуються електроприймачі. Це не потребує особливих матеріальних витрат і зусиль, а також істотних змін мережі та пошкоджень підлоги цеху.

Приєднання технологічного обладнання у відгалужувальній коробці до проводів магістралі здійснюється спеціальними затискачами без розрізання самих проводів. Розподільчі колонки виконують зі штепсельним роз'ємом, автоматом або ввідним рубильником і запобіжником і встановлюють на кришку відгалужувальної коробки.

Застосування пластмасових труб дозволяє економити стальні труби, а також знизити трудомісткість і вартість трубних електропроводок.

Пластмасові труби виготовляються з вініпласту, поліетилену та полі-пропилену. Їх заборонено застосовувати у вибухо- та пожежонебезпечних приміщеннях. Вони використовуються в нормальних та в приміщеннях сприятливих до корозії, а також у фундаментах під обладнання, в бетонних підлогах (крім гарячих цехів). З'єднання проводів всередині пластмасових труб не допускається, його виконують тільки в коробках.

На поліетилен і поліпропилен шкідливо впливають жири, нафтопродукти та тривала дія денного світла. З огляду на це труби допускається застосовувати тільки для закритої прокладки по негорючій основі та конструкціях, а також використовують їх для захисту кабелів в агресивних ґрунтах.

Проектування цехової мережі

Згідно з ПУЕ автоматичні вимикачі або запобіжники мають застосовуватися як апарати захисту цехових мереж. Апарати захисту слід установлювати в місцях мережі, де переріз провідника зменшується, а також у місцях приєднання провідників, що захищаються, до живильної лінії.

Запобіжники мають установлюватися на всіх незаземлених полюсах або фазах. Установлення запобіжників у нульових робочих провідниках заборонено. При захисті мережі з глухозаземленою нейтраллю розчеплювачі автоматичних вимикачів мають установлюватися в усіх незаземлених провідниках.

Пристрої захисту встановлюють у місцях приєднання відгалужень, що захищаються, до живильної лінії. Допускається установка апарата захисту на відстані до трьох метрів від живильної лінії у таких випадках:

1) провідник має оболонку, що не горить;

2) лінія виконана проводом у трубі.

При цьому переріз провідника до апарата захисту має бути не меншим, ніж після апарата.

Апарати захисту можна не встановлювати у вимірювальних колах і колах керування у разі виконання таких вимог:

1) провідники не виходять за межі машин і щитів;

2) провідники мають незаймисту ізоляцію;

3) проводи прокладено у трубі.

Установка апаратів захисту заборонена:

1) у нульових провідниках, що використовуються для заземлення;

2) у колах керування та сигналізації, якщо вимкнення їх може спричинювати небезпечні наслідки (пожежні насоси та ін.).

Від перевантаження необхідно захищати:

1) мережі у приміщеннях, що виконані відкрито прокладеними провідниками із займистою зовнішньою оболонкою чи ізоляцією;

2) освітлювальні мережі в пожежонебезпечних зонах, а також освітлювальні мережі в жилих і громадських будинках, у торгівельних приміщеннях, службово-побутових приміщеннях промислових підприємств;

3) силові мережі промислових підприємств, житлових і громадських будинків, торгівельних приміщень, коли за умовами технологічного процесу може виникати тривале перевантаження провідників;

4) мережі усіх видів у вибухонебезпечних зонах.

Кабельні ЛЕП.

Кабельні лінії прокладають у місцях, де заборонено будівництво повітряних ЛЕП. Завдяки захисту від атмосферних впливів, великій надійності та безпечності в експлуатації кабельні лінії широко застосовують в електричних мережах зовнішнього та внутрішнього електропостачання.

Кабель має струмопровідні жили, ізоляцію та захисні оболонки. За кількістю жил кабелі виготовляються одно-, дво-, три та чотирижильни-

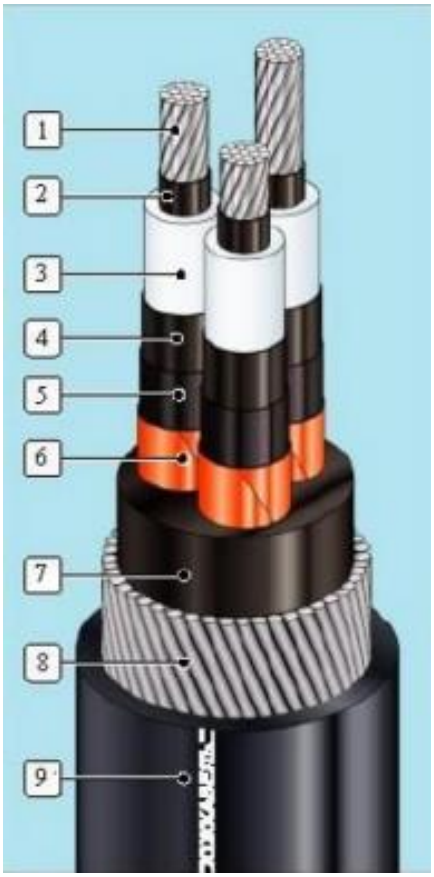
ми. Жили можуть бути з мідного або алюмінієвого дроту, одно- та багатодротні.

Ізоляцію кабелів до 1000 В виконують з гуми та синтетичних матеріалів, а кабелів вище 1000 В з багатошарового просоченого паперу та різних пластикатів (поліетилену, полівінілхлориду та ін.).

Захисні оболонки, які перешкоджають проникненню вологи, газів і кислот, виконують із свинцю, алюмінію та поліхлорвінілу. Для механічного захисту оболонок на них накладають сталеву або дротяну броню, на яку для кабелів, що прокладаються в землі та воді, накладають захисну сорочку з просоченої джутової пряжі.

На ГПП підприємств для вводів 35 -10 кВ останнім часом застосовують з ізоляцією зі зшитого поліетілену.

Кабельні лінії напругою до 1000 В великих перерізів прокладають для живлення потужних електроприймачів, розподільчих щитів або шаф, а також електроприймачів, встановлених у середовищі з особливими умовами, де обмежена прокладка проводів у трубах (рис. 6.6).



1 - алюмінієва струмопровідна жила, 2 - внутрішній екструдований шар, що напівпроводить, 3 - екструдована ізоляція із зшитого поліетилену, 4 - зовнішній екструдований шар, що напівпроводить, 5 - обмотка полотном, що напівпроводить, 6 - мідний екран, 7 - екструдована внутрішня оболонка, 8 - броня із сталевих оцинкованих дротів, 9 - екструдована зовнішня оболонка з ПВХ пластикату

Рисунок 6.6. Конструкція високовольтного кабеля з ізоляцією зі зшитого поліетілену

Прокладка кабелів відкрито на конструкціях.

Виконується по кабельних опорних конструкціях, що складаються з окремих деталей стояків і полиць. Кабельні конструкції серійно виготовляються заводами, та можуть бути встановлені вздовж стін приміщень, каналів і інших кабельних споруд, а також підвішені до перекриття, балок і інших елементів будівель. Кабелі, що прокладені горизонтально, жорстко закріплюють в кінцевих точках з обох боків вигинів та біля з'єднувальних муфт, а прокладені вертикально по всій опорній конструкції. Для трифазної мережі з метою зменшення витрат три ка-белі різних фаз прокладають в загальному пучці трикутником, закріплюючи спеціальними немагнітними скобами.

На кабельних конструкціях можуть прокладатися відкрито різні кабелі (броньовані та неброньовані). Такий спосіб прокладки дозволяє забезпечити якісний та індустріальний монтаж, але не гарантує захисту від механічного пошкодження кабелів. Тому цей вид прокладки знай-шов застосування в електротехнічних і виробничих приміщеннях, де відсутня можливість механічного пошкодження (рис. 6.7).

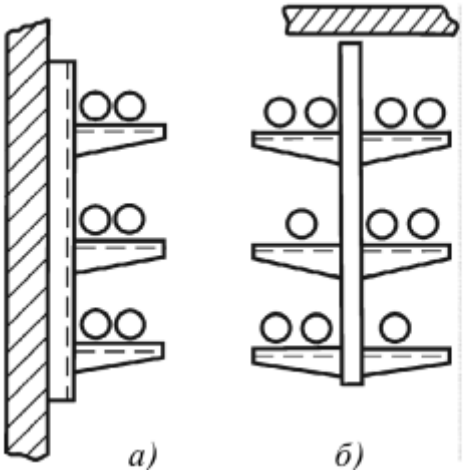


Рисунок 6.7 - Кабельні конструкції: а) настінна, б) із кріпленням на стелі

Виробництво з великою кількістю порівняно дрібних електроприймачів потребує прокладки розгалужених розподільчих мереж. Такі мережі доцільно виконувати кабелями, прокладеними на лотках або в коробах. Як виняток, в окремих, технічно виправданих випадках, у них можуть прокладатися кабелі перерізом понад 16 мм^2 Взагалі, прокладка кабелів великих перерізів недоцільна через необхідність зниження допустимих навантажень на кабелі та дотримання всіх правил, які відносяться до прокладки силових провідників (відстань між ними та ін.). Це в багатьох випадках може призвести до недоцільності застосування коробів і лотків.

Прокладка кабелів у земляних траншеях.

Забезпечує захист кабелю від механічних пошкоджень, завдяки його прикриттю цеглою або бетонними плитами. Як кабельну подушку за-

стосовують просіяну землю або пісок. Глибина прокладки кабелю не менша за 0,7 м від поверхні землі. При прокладці на меншій глибині (0,5 м), наприклад: при вводі в будівлю, кабель повинен мати надійний захист від механічних пошкоджень.

Ця прокладка є найпростішою та найдешевшою (рис. 6.8, 6.9).

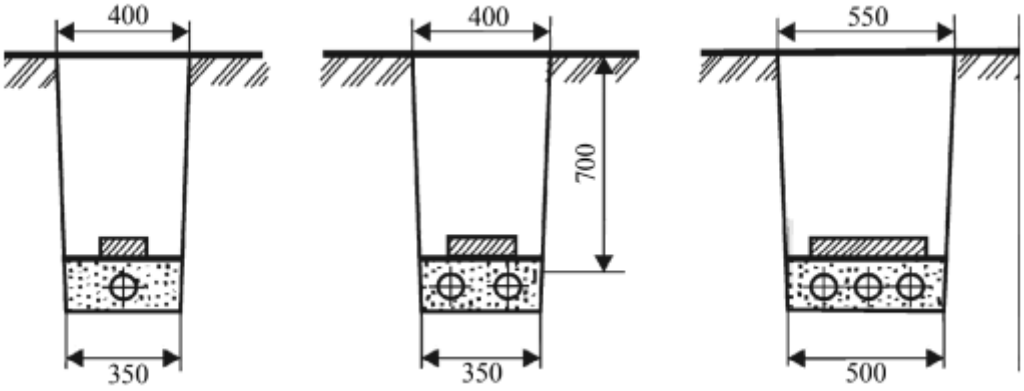


Рисунок 6.8 - Прокладка кабелів у земляних траншеях

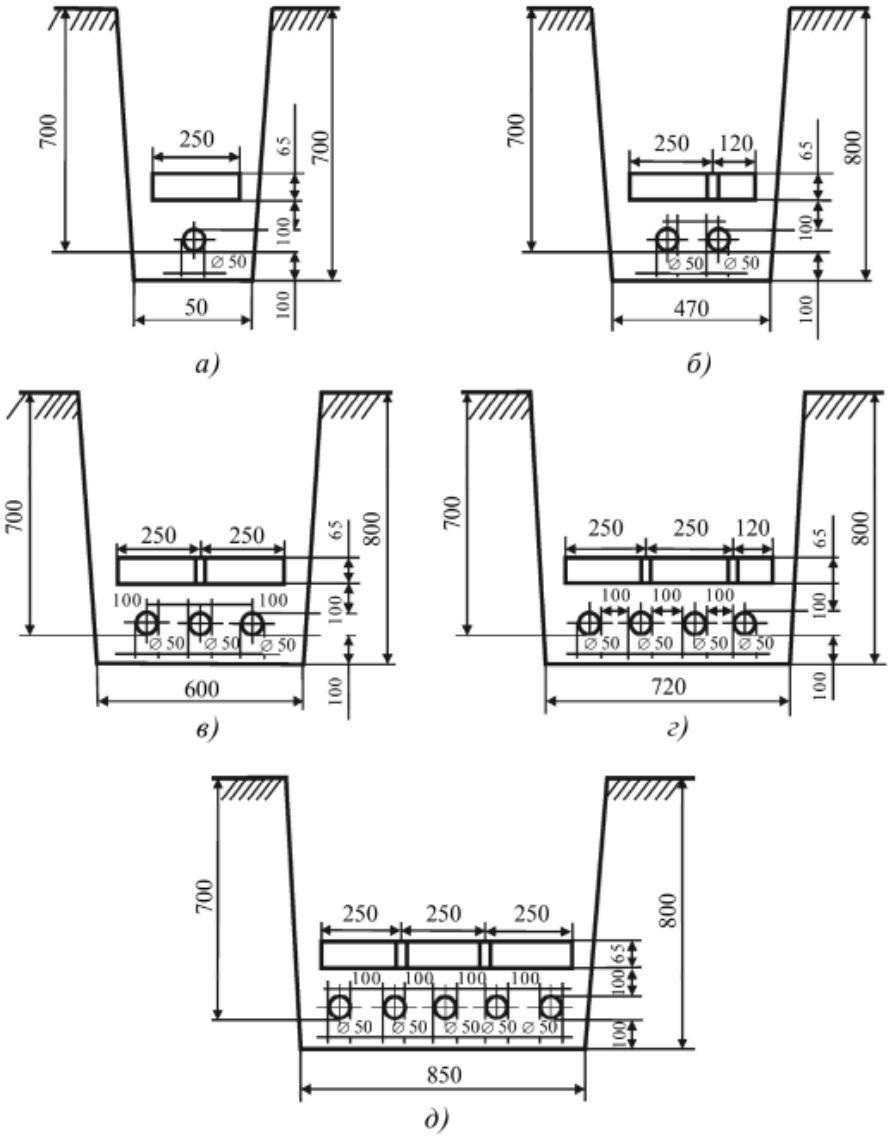


Рисунок 6.9. Конструкція та розміри кабельних траншей у залежності від кількості паралельних кабелів

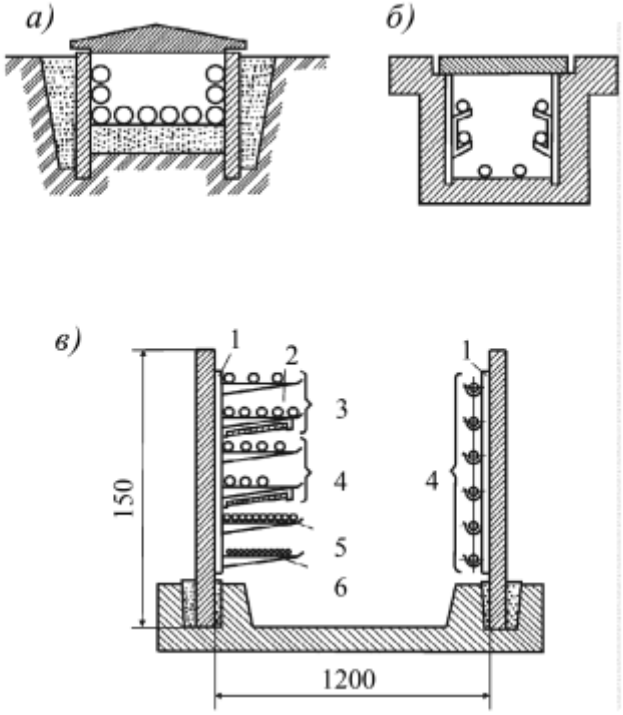
Прокладка кабелів у каналах.

Застосовується при невеликій кількості кабелів. Кабелі, які прокладені в каналах, добре захищені від механічних пошкоджень. В електротехнічних приміщеннях кабельні канали перекривають плитами на рівні підлоги приміщення (рис. 6.10).

Як правило, застосовують канали із збірних залізобетонних елементів. Можливо також спорудження кабельних каналів з монолітного залізобетону. Ширина та висота каналів 300-1200 мм. Канали можуть бути підземними з заглибленням на 300-700 мм або напівпідземними -на 150-300 мм.

Якщо число кабелів, що прокладаються в одному напрямі, невелике, то їх можна прокладати в трубах або прикривати швелерним чи кутовим залізом.

На ділянках, де можуть бути пролиті розплавлений метал або речовина, яка руйнує оболонку кабелів, спорудження кабельних каналів не допускається.



1 - кабельні конструкції; 2 вогнестійка перегородка; 3, 4 силові кабелі напругою понад 1 кВ та до 1 кВ відповідно; 5, 6 контрольні кабелі та кабелі зв'язку.

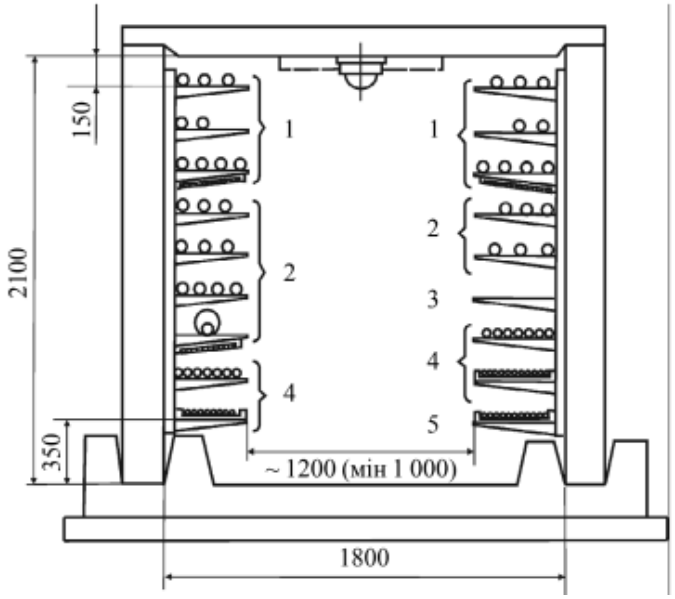
а) канал зовнішній, б) канал всередині приміщення, в) розміщення кабелів у приміщеннях

Рисунок 6.10. Прокладка кабелів у каналах

Прокладка кабелів у тунелях

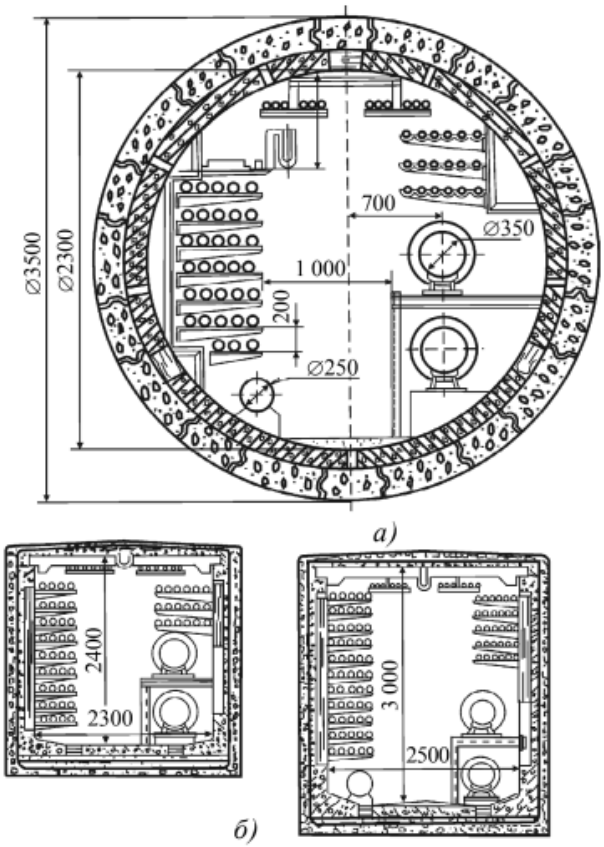
Здійснюється при великій кількості кабелів (30 і більше), а також за відсутності кабельної естакади. При прокладанні кабелів у тунелях на території промислових підприємств повинні бути передбачені протипо-

жежні заходи (поділ тунелю на відсіки з незалежною вентиляцією, наявність люків для пожежогасіння та ін.). Це найдорожчий спосіб прокладки (рис. 6.11, 6.12).



1 , 2 - силові кабелі напругою понад 1кВ та до 1 кВ відповідно, 3 - полки для муфт, 4 - контрольні кабелі, 5 - кабелі зв'язку.

Рисунок 6.11 - Розміщення кабелів у тунелях



а) тунель круглого перерізу; б) тунель прямокутного перерізу

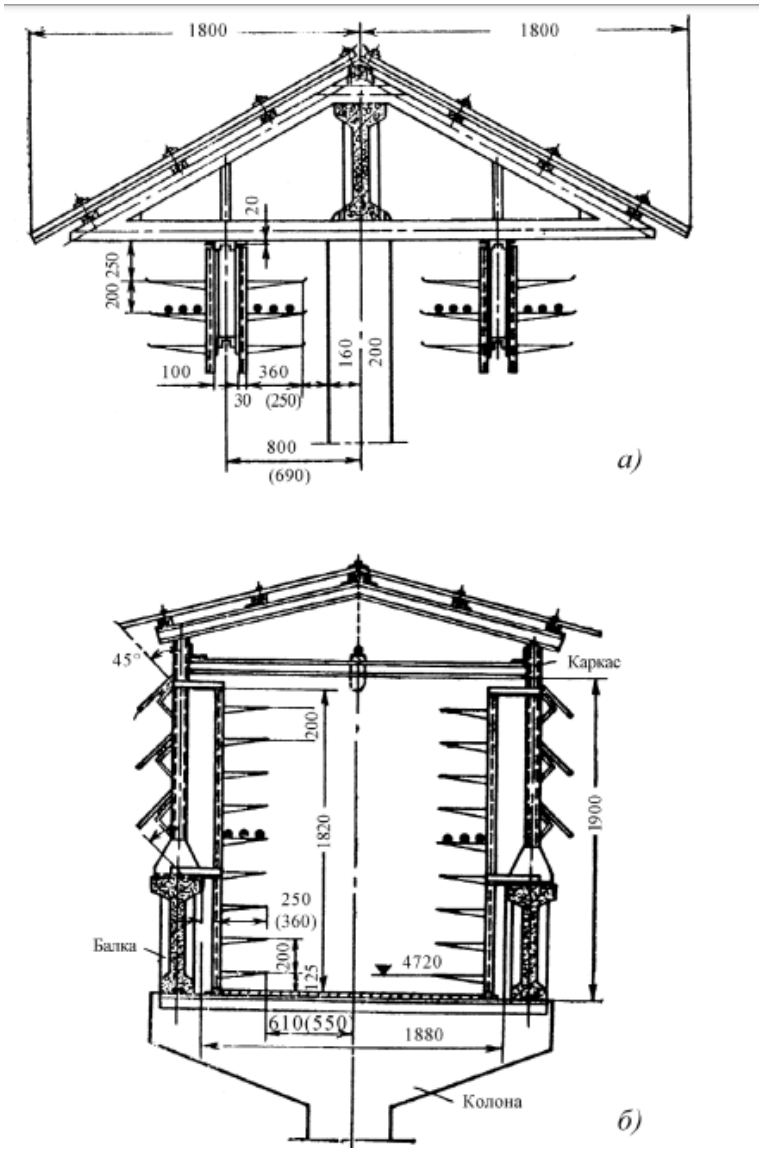
Рисунок 6.12 - Розміщення кабелів та трубопроводів у тунелях

Прокладка кабелів на естакадах

Її широко застосовують на підприємствах з великими концентрованими навантаженнями та при наявності в ґрунті хімічних реагентів.

Перевагами даної прокладки кабелів є зручність монтажу та експлуатації, можливість проведення монтажних робіт незалежно від повної готовності всього об'єкта, мала імовірність механічних пошкоджень.

Кабельні естакади бувають у вигляді відкритої споруди або у вигляді кабельної галереї відкритого типу (рис. 6.13). Для прокладки кабелів можна також використовувати естакади з технологічними трубопроводами.



а) дволанцюгова естакада, б) галерейна естакада.

Рисунок 6.13 - Види кабельних естакад

Прокладка в блоках

Кабельним блоком називають підземну споруду з каналами, призначеними для прокладки кабелю (рис. 6.14).

Для спорудження кабельних блоків використовують одноотворні (одноканальні) гончарні, азбестоцементні або бетонні труби, які укладаються в один або декілька рядів у траншею на бетонну основу. Після стикування труби скріплюють бетоном у загальний блок. Для блочної прокладки застосовують збірні багатоканальні бетонні блоки. В місцях з'єднання та відгалуження кабелів, а також на прямих ділянках кабельних ліній довжиною понад 150 м для полегшення протяжки кабелів через отвори блоків влаштовують колодязі, в які вводять труби блока. Блоки та колодязі, які споруджені у вогких ґрунтах або нижче за рівень ґрунтових вод, покривають гідроізоляцією. Труби в блоках укладають з невеликим нахилом до колодязів, куди стікає вода (рис. 6.15).

Прокладка кабелю в тунелях, каналах і блоках забезпечує його захист від механічних пошкоджень і зменшує витрати на ремонт, який у таких випадках роблять без земляних робіт, не заважаючи пішохідному та автомобільному руху. Але така прокладка кабелю коштує значно дорожче за інші і тому застосовується тільки для особливо відповідальних ліній або магістралей з великою кількістю кабелів.

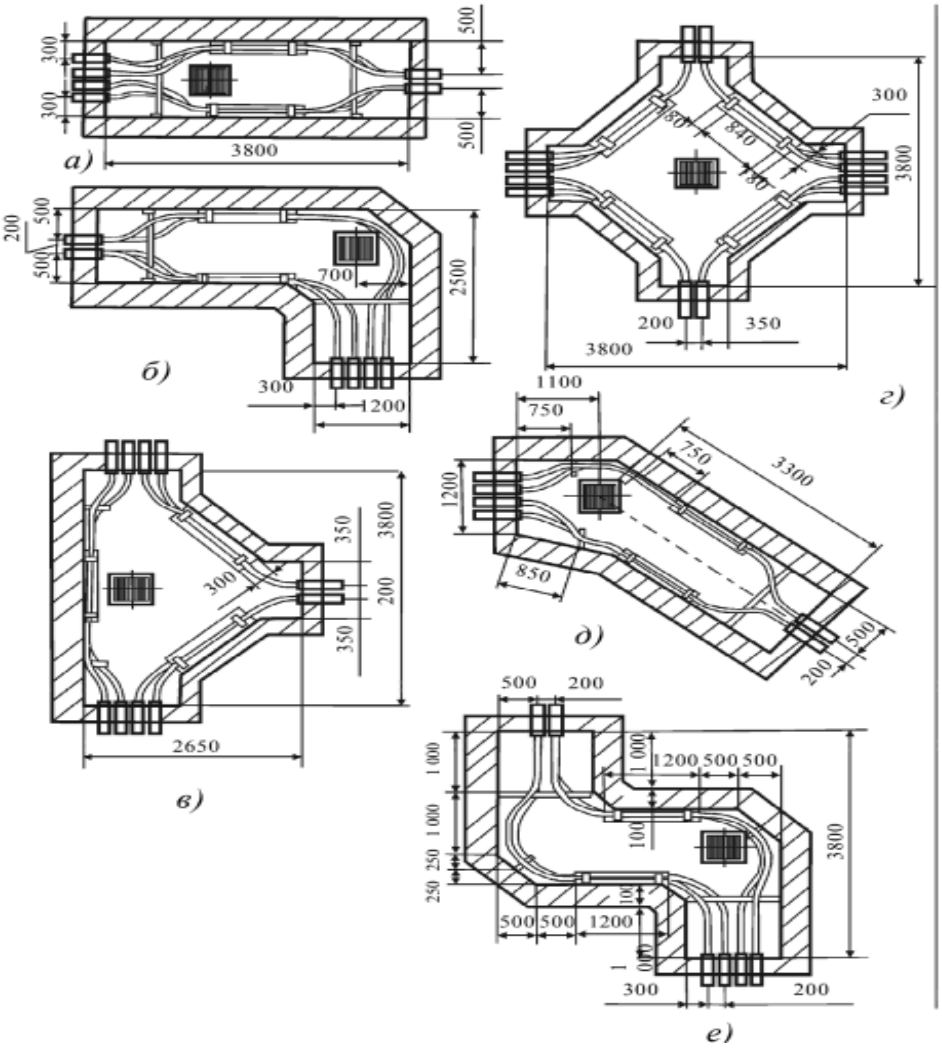


Рисунок 6.14 - Види колодязів при прокладці кабелів у кабельних блоках

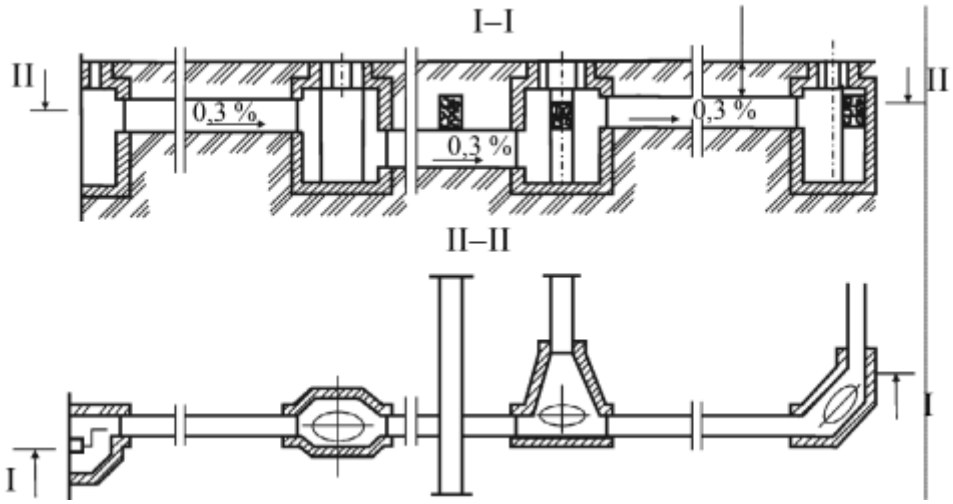


Рисунок 6.15 - Схема розміщення колодязів по трасі

Конфігурація мереж живлення промислових підприємств

При потужності підприємства близько 100 кВт і наявності електроприймачів тільки третьої категорії живлення здійснюється по одиночній ЛЕП повітряній або кабельній (рис. 6.16).

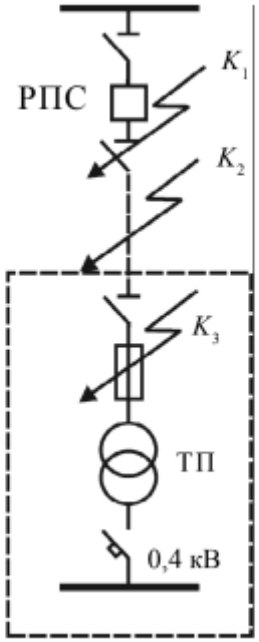


Рисунок 6.16 - Схема живлення невеликих підприємств

При пошкодженні в будь-якій точці електропостачання порушується на тривалий час.

При потужності підприємства близько 1000 кВт і наявності приймачів II і III категорій підприємство може отримувати електроенергію від кільцевої міської мережі (рис. 6.17).

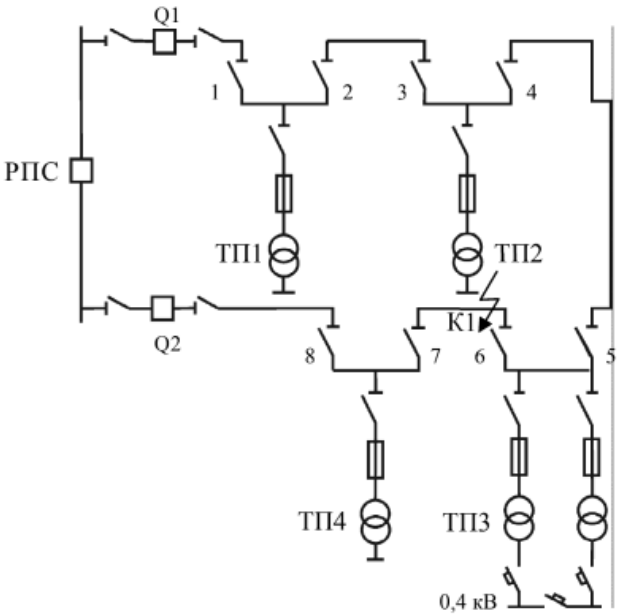


Рисунок 6.17 - Схема живлення підприємства від кільцевої мережі міста

ТП3 - це ТП промислового підприємства.

Інші підстанції для живлення житлових будинків.

Кільцева мережа працює в розімкнутому режимі. Наприклад: роз'єднувач 4 знаходиться в розімкнутому режимі. Під час аварій мережа працює так.

Наприклад: аварія в точці К1, спрацьовує релейний захист на вимикачі О, і виключає ТП4 і ТП3. Виїзна бригада протягом 30 хв. повинна локалізувати аварію, відключивши роз'єднувачі 6 і 7. Після цього включається роз'єднувач 4 і вимикач О. Електропостачання всіх ТП поновлюється.

Ремонт лінії виконується у зручний для ремонтних робіт час.

При потужності підприємства близько 10 000 кВт і наявності електроприймачів I і II категорій електрична мережа виконується дволанцюговою ЛЕП, повітряною або кабельною (рис. 6.17).

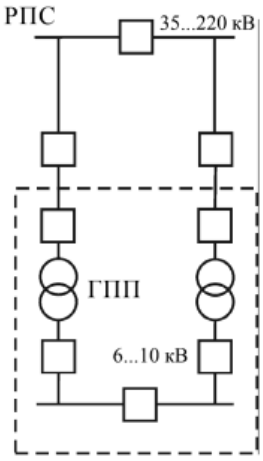
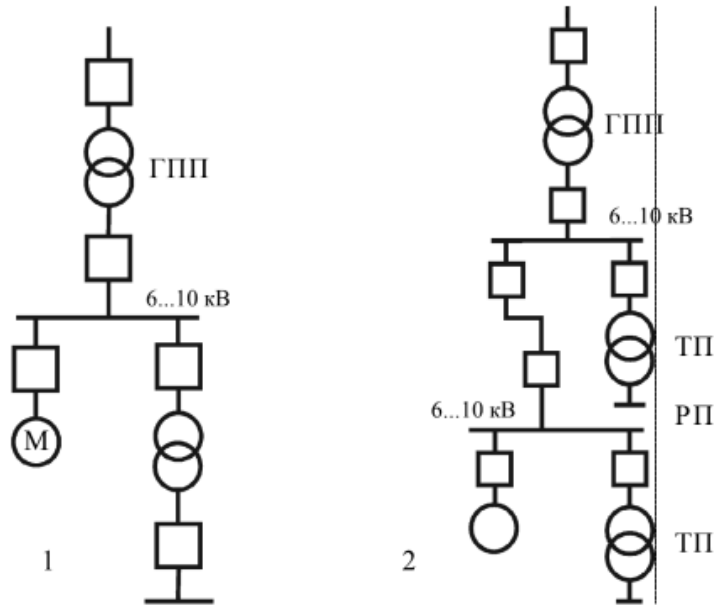


Рисунок 6.18 - Схема мережі живлення великого підприємства

Високовольтні розподільчі мережі можуть бути радіальні та магістральні.

На рис. 6.19 подано схеми радіальних розподільчих мереж промислових підприємств.



1 - одноступенева радіальна мережа, 2 двоступенева радіальна мережа

Рисунок 6.19 - Радіальна розподільча мережа

Одноступенева радіальна схема мережі рекомендується на невеликих і середніх підприємствах, двоступенева на великих підприємствах із значною кількістю високовольтних електроприймачів (високовольтні електродвигуни, електропечі) (рис. 6.19).

Радіальні мережі відзначаються високою надійністю (рис. 6.20).

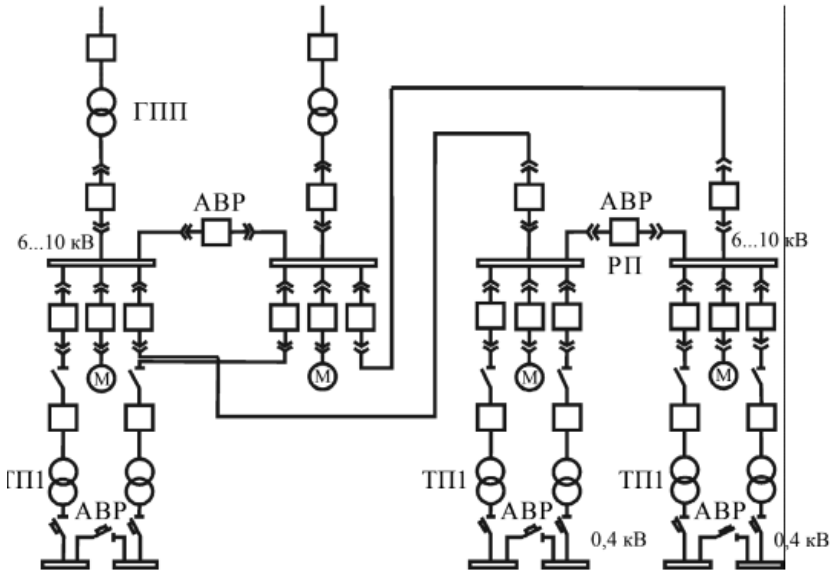


Рисунок 6.20 - Радіальна схема з глибоким резервуванням

Схема застосовується для живлення електроприймачів усіх категорій. Автоматичне включення резерву передбачене на ГПП, РП, ТП (рис. 3.27).

На рис. 6.24 подано найпростішу схему магістральної мережі одинична магістраль з одностороннім живленням.

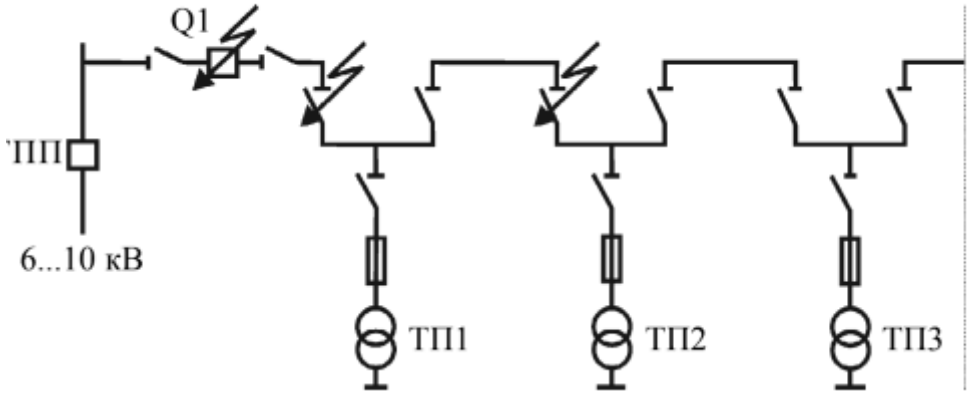


Рисунок 6.21 - Одинична магістраль з одностороннім живленням

Схема застосовується для живлення електроприймачів тільки III категорії. При виході з ладу одного з елементів (вимикача Q, роз'єднувача) порушується електропостачання всіх електроспоживачів (рис. 6.21).

Для живлення електроприймачів II і III категорій застосовується кільцева магістраль (рис. 6.22).

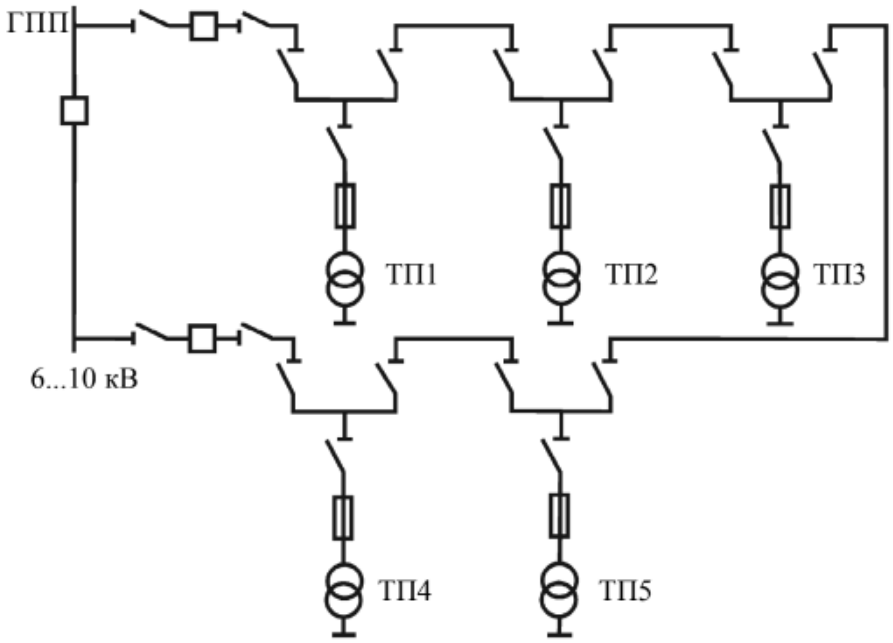


Рисунок 6.22 - Кільцева магістраль

Схема підключається до двох секцій шин однієї підстанції, тобто схема замкнена, але працює в розімкнутому режимі. Один із роз'єднувачів схеми розімкнутий.

На великих підприємствах, які мають декілька РП, може застосовуватися одинична магістраль з двостороннім живленням (рис. 6.23).

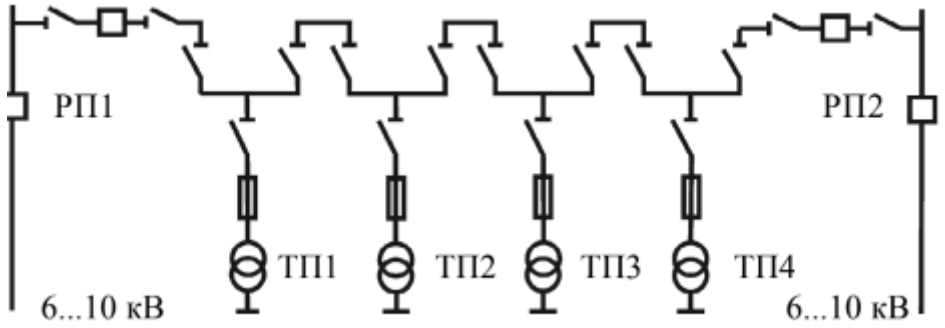


Рисунок 6.23. Одинична магістраль з двостороннім живленням

Схема замкнута, але завжди працює в розімкнутому режимі. Рекомендується для живлення електроприймачів II і III категорій.

Для живлення споживачів усіх категорій рекомендується подвійна магістраль (рис 6.24).

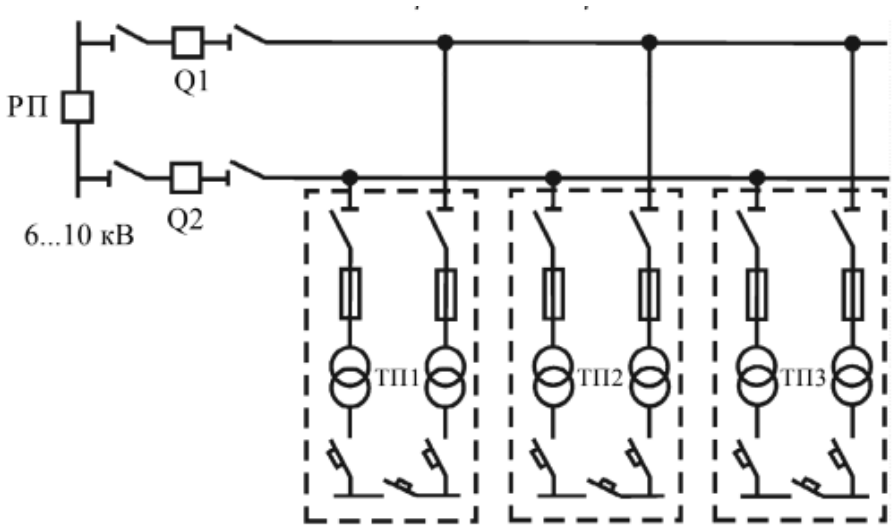
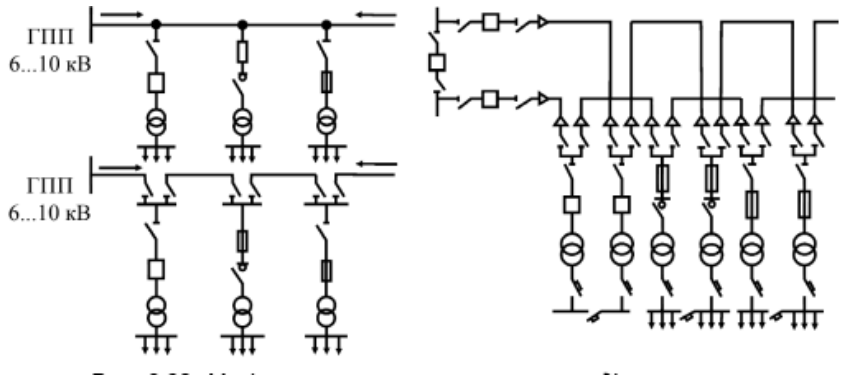


Рисунок 6.24 - Подвійна магістраль.

На рис. 6.20-6.24 подані схеми з роз'єднувачем на стороні високої напруги ТП. Але реальні схеми можуть мати інші комутаційні апарати (рис. 6.25).

На рис. 6.26 подано схему комбінованої розподільчої мережі.

Комбінована схема (рис. 6.26) складається з радіальних і магістраль них ліній. При лінійному розміщенні ТП слід віддавати перевагу магістральним лініям. При безсистемному розміщенні ТП - радіальним лініям. Конфігурація розподільчої мережі конкретного підприємства визначається за допомогою генерального плану цього підприємства (рис. 6.27).



а- одинична магістраль; б подвійна магістраль

Рисунок 6.25 - Магістральна високовольтна розподільча мережа.

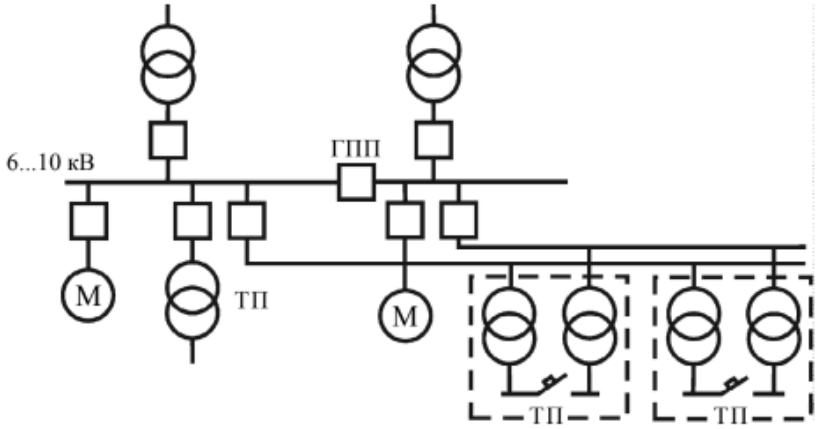


Рисунок 6.26 - Комбінована схема розподільчої мережі.

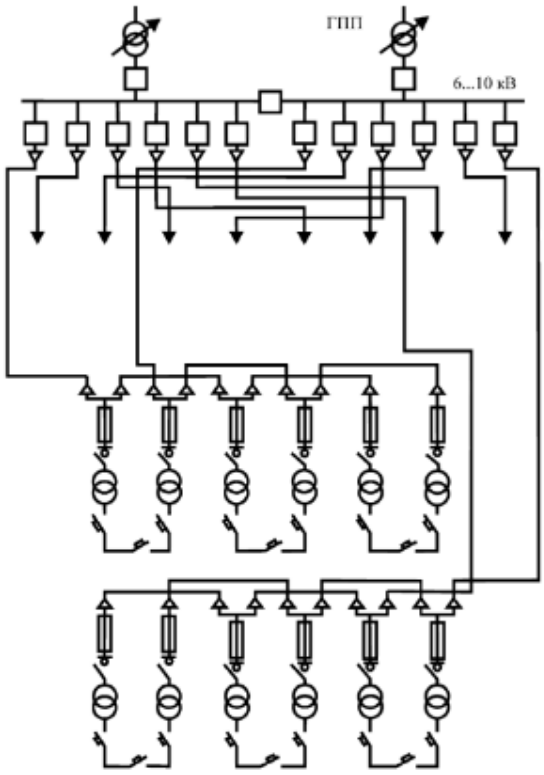


Рисунок 6.27 - Схема високовольтної розподільної мережі підприємства

Високовольтний струмопровід.

Високовольтний струмопровід застосовується, якщо великі споживачі знаходяться на значній відстані від ГПП. Розглянемо два варіанти живлення великих електроприймачів. Перший варіант кабельними лініями (рис. 6.28), другий варіант високовольтним струмопроводом (рис. 6.29).

До переваг високовольтного струмопровода слід віднести значну економію кабельної продукції, до недоліків суттєве збільшення зони аварії.

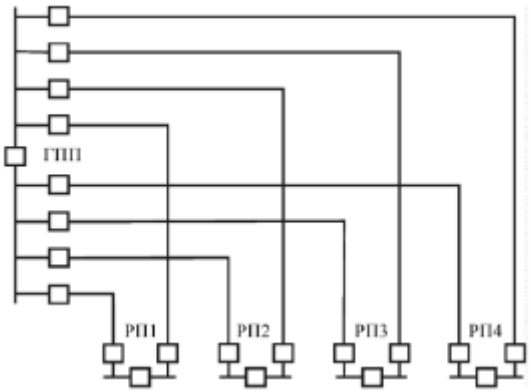


Рисунок 6.28 - Схема розподільної мережі, виконаної кабельними лініями

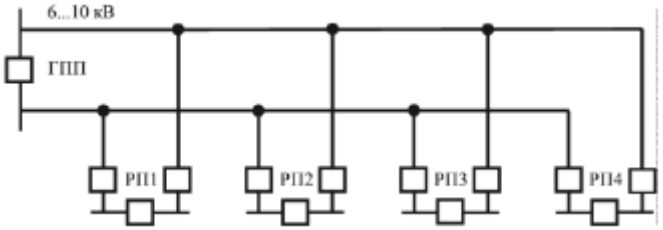


Рисунок 6.29 - Схема розподільчої мережі, виконаної високовольтним струмопроводом

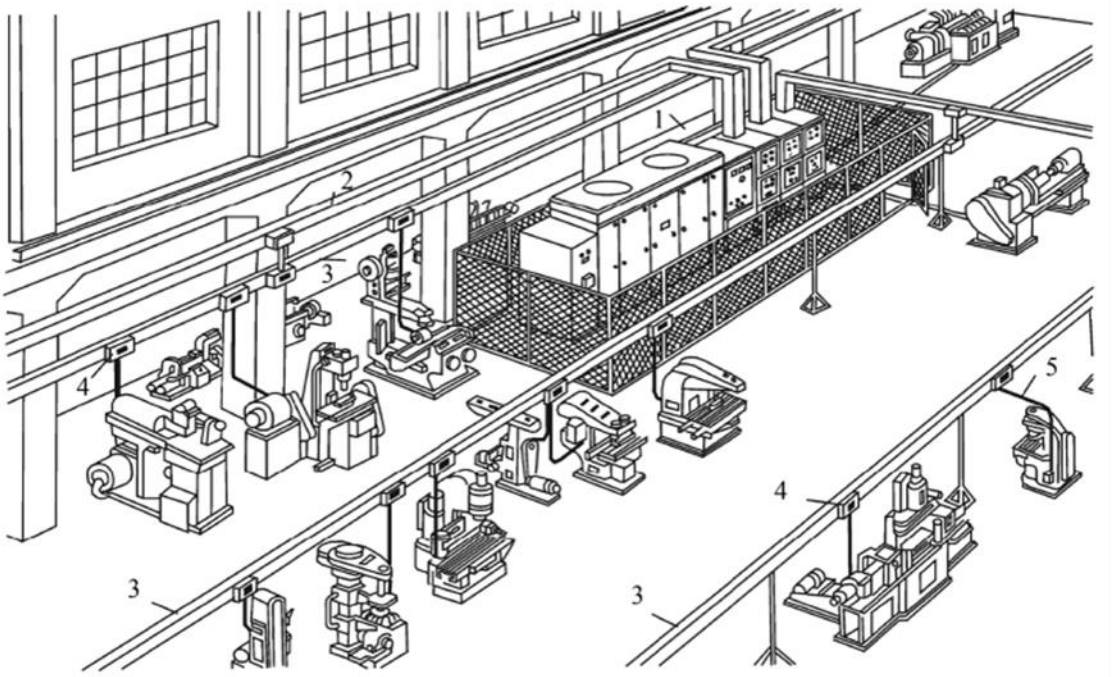
Комплектні шинопроводи

В електричних мережах підприємств широко застосовують також шинопроводи. Вони можуть бути відкритими або закритими, а за призначенням їх поділяють на магістральні та розподільчі. Магістральні шинопроводи виготовляють із алюмінієвих шин, розподільчі з алюмінієвих або мідних шин.

Найбільш розповсюджені закриті магістральні шинопроводи серії ШМА та розподільчі закриті шинопроводи серії ШРА з алюмінієвими шинами.

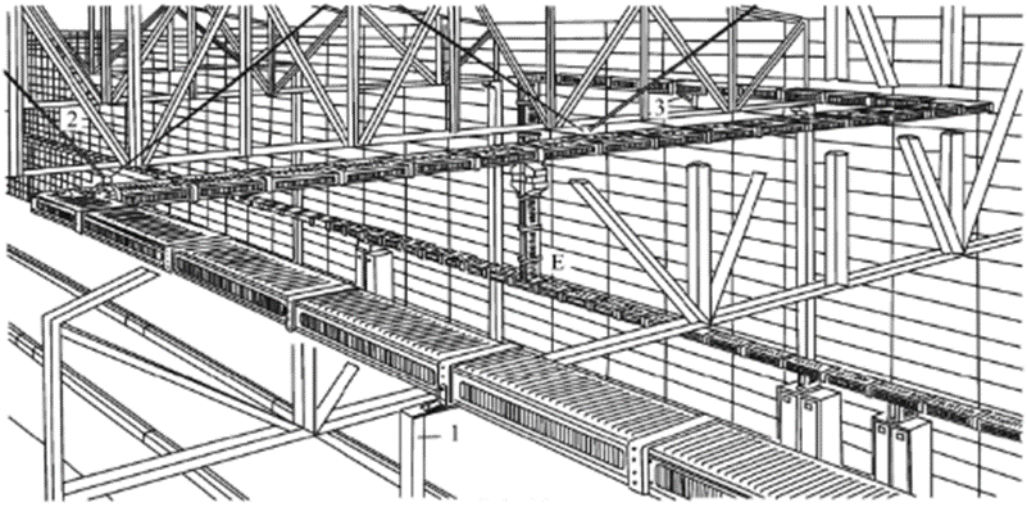
Магістральні шинопроводи

Шинопроводи серії ШМА застосовують для передачі електричної енергії трифазного струму частотою 50, 60 Гц напругою до 660 В з глухозаземленою нейтраллю. Закріплюють їх на нижньому поясі металічних ферм або на кронштейнах чи спеціальних стояках (рис. 6.30, 6.31).



1 - КТП, 2- магістральний шинопровід, 3 - розподільчий шинопровід, 4 відгалужувальна коробка, 5 підключення окремого електроприймача до розподільчого шинопроводу.

Рисунок 6.30 - Розподілення електроенергії в цеху за допомогою шинопроводів



1- на стойках, 2-на тросах, 3 на кронштейнах

Рисунок 6.31 - Способи прокладки магістрального шинопроводу типу ШМА в цеху

Магістральні шинопроводи в аварійних режимах витримують перевантаження, встановлені для трансформаторів. Номінальні струми шинопроводів прийняті з урахуванням температури навколишнього середовища 40 °С. При інших температурах відповідно змінюється допустимий струм шинопроводу. В машинобудівельних цехах температура навколи-

шнього середовища менша 40 °С і це треба враховувати при виборі шинопроводів,

Зараз промисловістю випускаються шинопроводи для мереж постій ного струму типу ШМАД. Їх можуть використовувати для з'єднання перетворювачів з електродвигунами приводів і механізмів прокатних станів, а також для електричних мереж постійного струму в промислових установках загального призначення напругою до 500 В. Приміщення, в яких застосовують шинопроводи, мають бути обладнані засобами автоматичного пожежогасіння.

Шинопроводи типу ШМА складаються з таких секцій прямих довжиною 750, 1500, 3000, 4500 та 6 000 мм; кутових з вигином шин на площину та ребро; трійникових (вертикальних і горизонтальних); відгалужувальних; секцій регулювання довжини. Крім того, в шинопровід входять торцева та кутова кришки та болтовий стискач. Відгалуження на магістральних шинопроводах можна здійснювати тільки в місцях з'єднання секцій (рис. 6.32).

Кутові секції використовують для поворотів трас на 90° в горизонтальній та вертикальній площинах. Для відгалужування шинопроводу на три напрями є трійникові горизонтальні та вертикальні секції.

Довжину секції регулювання можна змінювати в межах 500-1050 мм. обрізанням кожуха чи шин. Їх застосовують у місцях підведення до обладнання, в місцях проходу шинопроводу через стіни та перекриття приміщень.

Приєднувальні секції використовують для з'єднання ввідних шаф низької напруги КТП. Ці секції бувають нормальними та фазувальними (із зворотним чергуванням фаз) і призначені для зберігання фазування шин КТП, що розташовані на кінцях однієї магістралі (рис. 6.32).

Гнучкі секції виконані з великої кількості одножильних ізольованих проводів марки АПВ перерізом 95-120 мм² (12 на фазу) застосовують ся для перетину будівельних перешкод, коли це важко виконати кутовими секціями. Гнучка секція може бути вигнута під кутом 90° 180°.

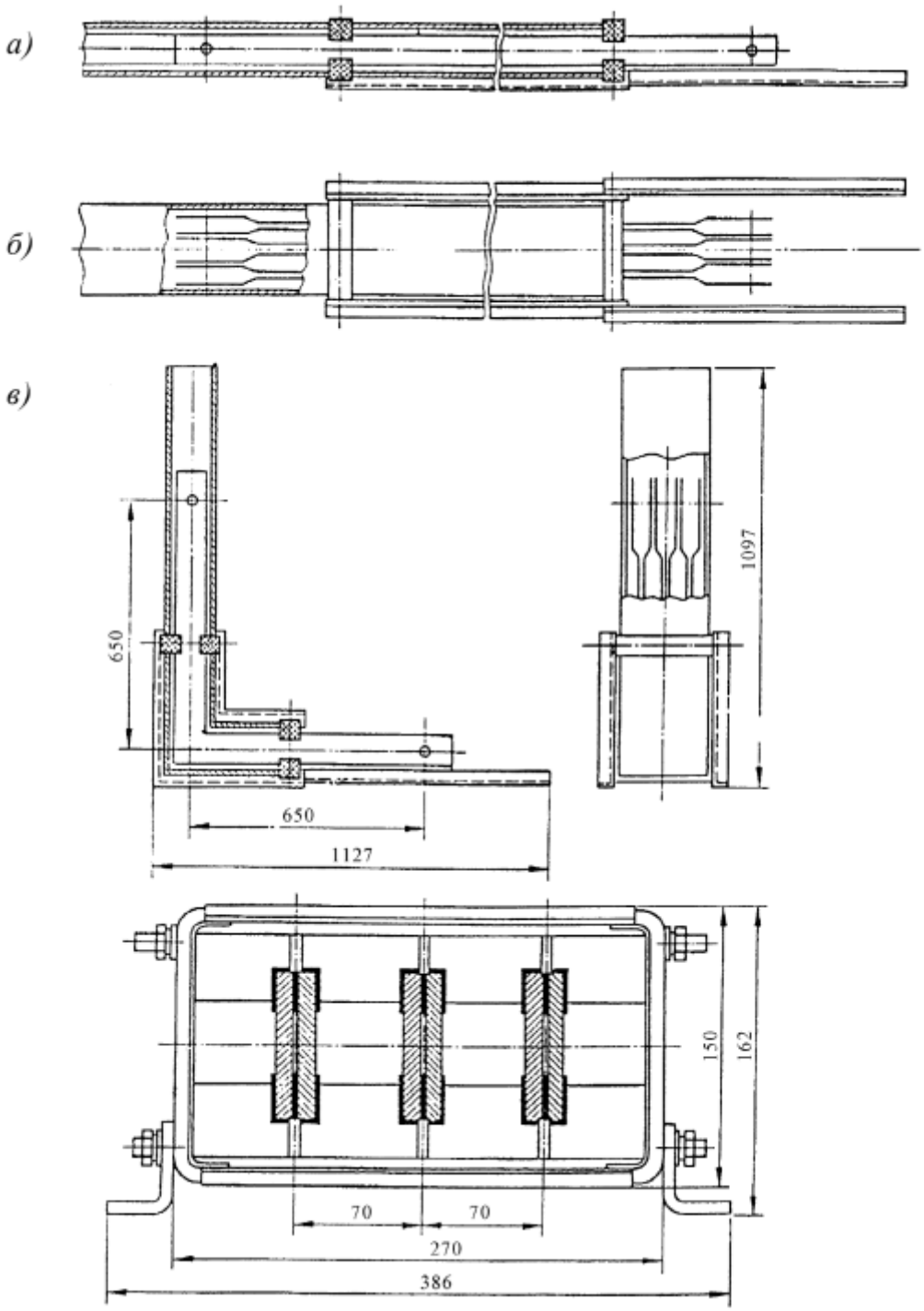
Відгалужувальні секції шин шинопроводу виготовляються двох видів: для безпосереднього (глухого) приєднання до шинопроводу та для при єднання за допомогою комутаційного апарата. При цьому секції з глухим приєднанням до шинопроводу виконуються у двох модифікаціях, з нижнім і боковим виводом, що дуже важливо при приєднанні до споживачів. Ці секції можуть бути встановлені під шинопроводом або над ним.

Відгалужувальні секції глухого приєднання використовують, коли відстань між ввідною шафою електроприймача і шинопроводом не перевищує 3-5 м. Збільшення цієї відстані до 80 м можливе за умови встановлення в місці відгалужування захисного апарата.

Коли необхідний комутаційний апарат в головній частині відгалуження, використовують відгалужувальну секцію (за відсутності такого апарата у ввідній шафі електроприймача).

Перехідна секція з одного шинопроводу на інший застосовується, якщо мережа ступінчата за струмом, або для переходу на кабель.

Підключення ШМА до розподільчих пристроїв (шаф) підстанцій типу КТП виконується через приєднувальні секції ШМА, які з'єднуються з комутаційно-захисною апаратурою, що розміщена в шафах КТП.



а) пряма секція; б) кутова секція; в) розміщення шин за методом "спарених фаз"

Рисунок 6.32 - Магістральний шинопровід серії ШМА

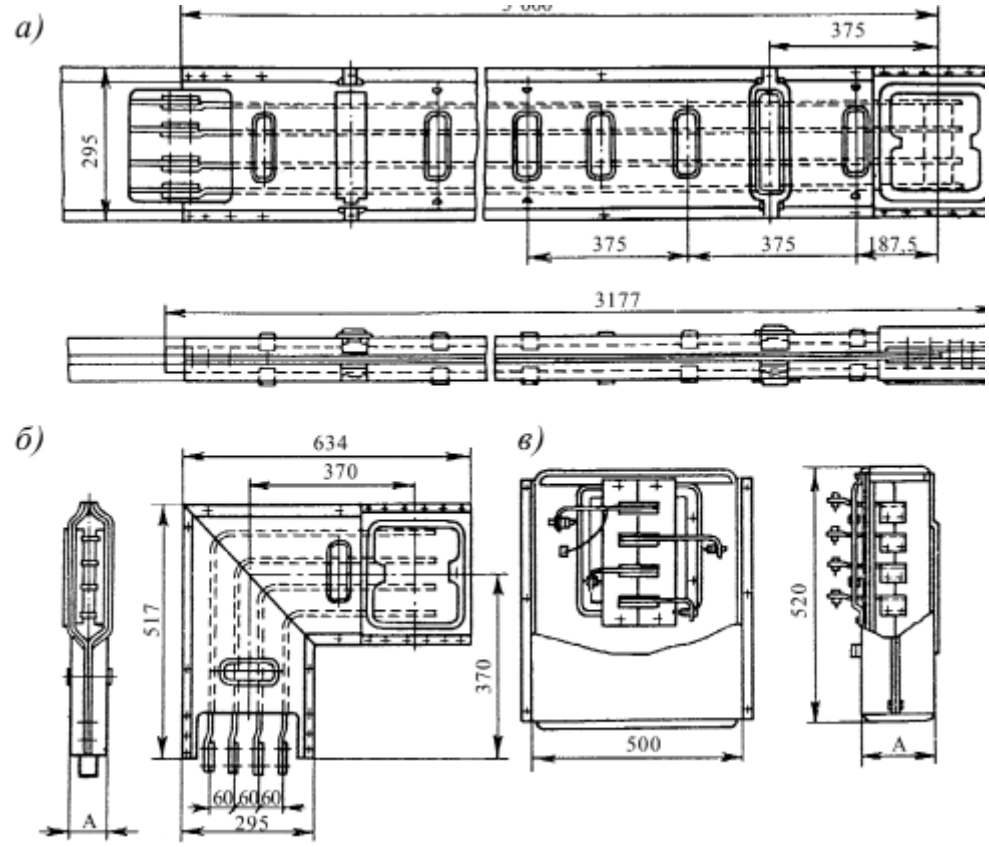
Розподільчі шинопроводи.

Шинопроводи до шин підстанцій приєднують кабелем або проводом, який підводиться до ввідної коробки, що встановлюється в місці з'єднання двох секцій шинопроводу. До магістральних шинопроводів, їх, як правило, приєднують через ввідну коробку, що встановлена на розподільчому шинопроводі, і з'єднується з відгалужувальною секцією магістрального шинопроводу кабельною перемичкою. Підключення електроприймачів цеху до шинопроводів показано на рис. 6.30.

Розподільчий шинопровід серії ШРА застосовується всередині приміщень в розподільчих електричних мережах трифазного струму частотою 50 і 60 Гц напругою 380/220 В з глухозаземленою нейтраллю (рис. 6.32).

Шинопровід ШРА4-100-44-1УЗ комплектується такими секціями: прямою L =2 000 мм для двох відгалужень, L =3 000 мм для трьох і шести відгалужень, L = 1000 мм для одного відгалуження та L = 750 мм для одного відгалуження; прямою L =3 000 мм без відгалуження; гнучкою; кутовою; ввідною з відгалужувальними коробками і запобіжниками на 25 А або автоматичними вимикачами на такий же струм. Цей шинопровід забезпечує штепсельне приєднання три- та однофазних електроприймачів (верстатів, електроінструментів, обладнання, що встановлюється на конвеєрах і автоматичних лініях та ін.).

Шинопроводи ШРА4-250-32-1УЗ та ШРА4-630-32-1УЗ застосовують У приміщеннях з нормальним навколишнім середовищем.



а, б пряма та кутова секції відповідно; в - коробка для вводу

Рисунок 6.33 - Розподільчий шинопровід серії ШРА

Вони комплектуються такими секціями: прямо L =3 000 мм для двох відгалужень або L = 1000 мм для чотирьох відгалужень; кутовою (у вертикальній та горизонтальній площинах), ввідною з відгалужувальними коробками з запобіжниками на 100 А, автоматичними вимикачами на 100 А, 160 А, 250 А, роз'єднувачами на 160 А, 250 А та 400 А.

Шинопроводи типу ШРПУ3 призначені для використання в приміщеннях з пильним середовищем, а також у пожежонебезпечних приміщеннях (П-II та П-Па). Це захищені від пилу шинопроводи виконання IP54. Вони комплектуються такими секціями: прямою L =1 000 мм; L = 3000 мм; секцією регулювання довжини; кутовою; перехідною на 250 А, 400 А, 630 А; ввідною з відгалужувальними коробками з запобіжниками на 100 А, автоматичними вимикачами на 100 А, 160 А, 250 А, роз'єднувачами на 160 А та 250 А.

Електроприймачі підключаються до розподільчого шинопроводу спеціальними відгалужувальними коробками на 100 А, автоматичними вимикачами та роз'єднувачами на різні струми.

На бокових сторонах прямих секцій передбачаються спеціальні вікна, що автоматично закриваються шторками для безпечного приєднання відгалужувальних коробок до шинопроводу.

Підведення живлення до шинопроводів здійснюється як в кінці, так і в сере дині лінії, тобто в будь-якій точці, через ввідну секцію. Ввідна секція, як правило, повинна мати номінальний струм вищий, ніж у інших секцій шинопроводу.

За вимогами техніки безпеки, при відкриванні кришки відгалужувальної коробки електроприймач вимикається. Якщо відгалуження до електроприймача не потребує захисту, тоді на кришці коробки встановлюють ножі, які при закритій кришці входять в губки патроноприймача. Керування установочним апаратом, змонтованим всередині відгалужувальної коробки, виконується рукояткою, що закріплена на стінці коробки.

Шинопроводи встановлюють на спеціальних стояках, на стінах, на кронштейнах, на колонах будівель та ін.

Промисловість також випускає спеціальні види шинопроводів:

освітлювальні та тролейні.

Освітлювальні шинопроводи.

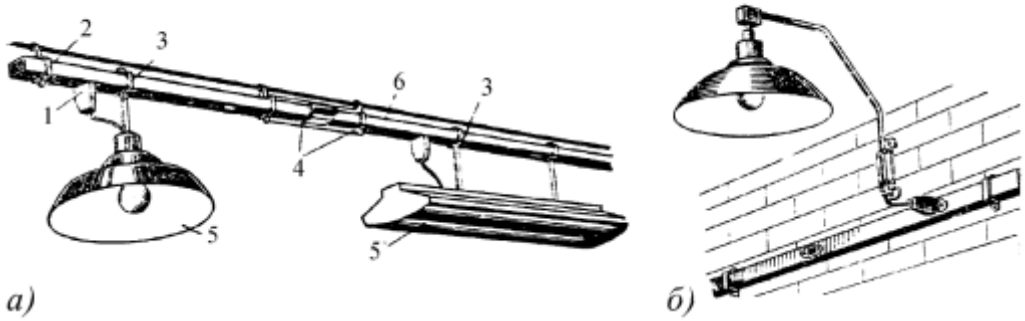
Такі шинопроводи застосовують для живлення світильників і електроприймачів невеликої потужності у виробничих і електротехнічних приміщеннях і випускаються на напругу 380/220В. Допускається їх використання в пожежонебезпечних приміщеннях будь-яких класів, а також у приміщеннях з пильним середовищем.

Шинопроводи виготовляють у вигляді окремих секцій (прямих, кутових, ввідних, гнучких та ін.). Електричне з'єднання окремих секцій між собою штепсельне (рис. 6.34, 6.35).

Механічне з'єднання суміжних секцій виконують за допомогою з'єднувальних муфт. Прямі секції забезпечені штепсельними вікнами-

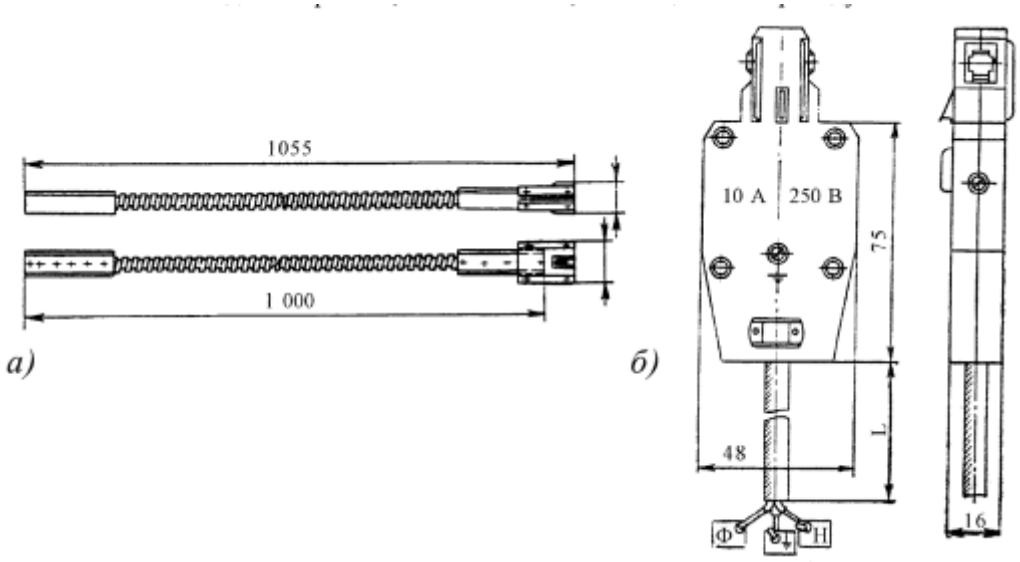
розетка-ми для приєднання електроприймачів. Ці вікна розташовані через 0,5 м.

Шинопровід монтується за допомогою спеціальних монтажних деталей для кріплення на стінах, будівельних фермах, тросах, кронштейнах і безпосередньо до розподільчого шинопроводу.



а) на тросі, б) до стін цеху. 1 штепсель, 2, 3 хомути кріплення шинопроводу, 4- підвіска тросова, 5 світильник, 6 секція шинопроводу

Рисунок 6.34 - Приклади кріплення освітлювального шинопроводу



а) - гнучка секція, б) штепсель

Рисунок 6.35 - Елементи освітлювального шинопроводу

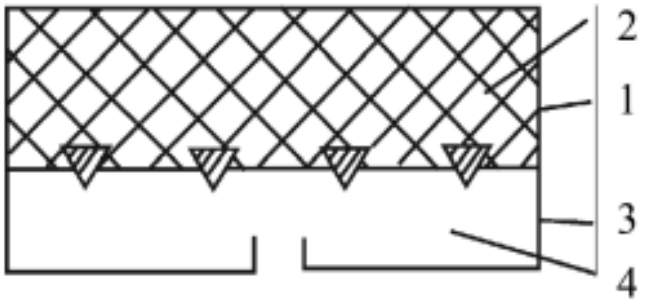
Тролейні шинопроводи.

Такі шинопроводи типу ШТМ на струм 100 А, 250 А, 400 А застосовують у виробничих приміщеннях для ліній змінного струму, що живлять трифазні та однофазні пересувні електроприймачі, крани, кран-балки, тельфери та різні електрифіковані інструменти напругою до 660 В.

Шинопроводи ШТМ76-У3 використовують для живлення пересувних електроприймачів з автоматичним адресуванням вантажів (рис. 6.43).

Конструкції типу ШТМ виготовляють на струми 100...400 А.

Якщо не можна застосовувати шинопроводи типу ШТМ, живлення електроприймачів пересувних підйомно-транспортних пристроїв здійснюють гнучким кабелем, підвішаним до тросу на кільцях, роликах, рухомих каретках або кабелем, що намотується на спеціальні кабельні барабани. На тельферах і кранах невеликої вантажопідйомності застосовують, головним чином, гнучкі кабелі (КРПТ, ГРШ). Для живлення потужних транспортних пристроїв використовують тролеї зі сталі різних профілів або алюмінієвого сплаву. При кількості кранів більше одного необхідно на тролеях передбачати ремонтні ділянки, які розташовують у незаповнених технологічним обладнанням місцях. Живлення підлогових електрифікованих візків здійснюють тролеями, розміщеними в тунелях. Допускається також використання гнучких кабелів, які прокладають у спеціальному каналі.



1- тролей з фосфористої бронзи, 2 - ізоляція, 3 - корпус з листової сталі, 4 - простір для каретки з ковзунковим контактом

Рисунок 6.36 - Конструкція тролейного шинопроводу

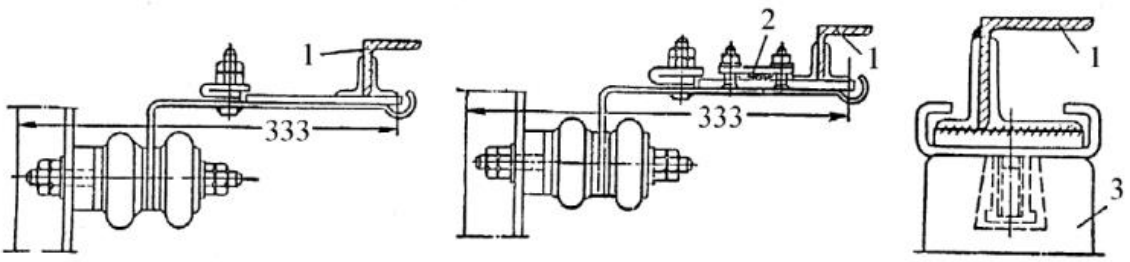
Мережі рухомих споживачів

У цехах до рухомих споживачів відносяться: мостові крани, козлові крани, в кар'єрах - електроекскаватори. В нормальних приміщеннях для живлення мостових кранів використовують тролейний шинопровід або стальні тролеї з кутової сталі. При значних струмах паралельно тролеям прокладають алюмінієву шину (рис. 6.37, 6.38, 6.39, 6.41).

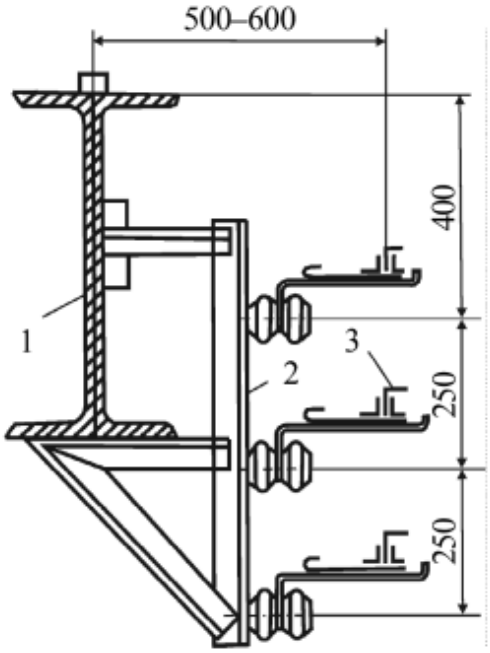
У пожежо- і вибухонебезпечних приміщеннях крани отримують живлення за допомогою гнучкого кабелю КРПТ. Кабель кріпиться на тросі і пересувається на тросі разом з краном (рис. 3.47).

Для живлення козлових кранів використовується цей же кабель КРПТ, але прокладають його по землі в дерев'яному коробі.

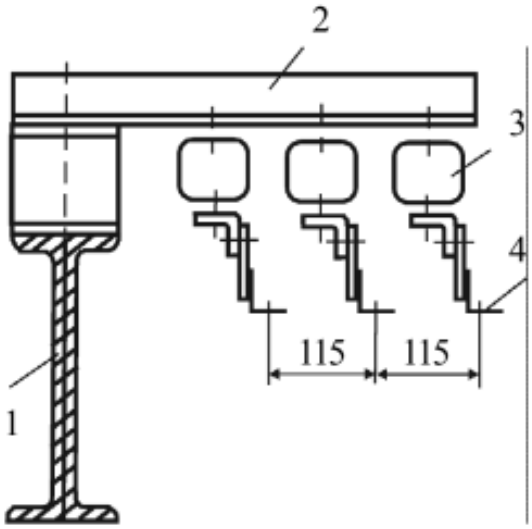
Для підключення ручного електроінструмента рекомендується тролейний шинопровід типу ШТМ.



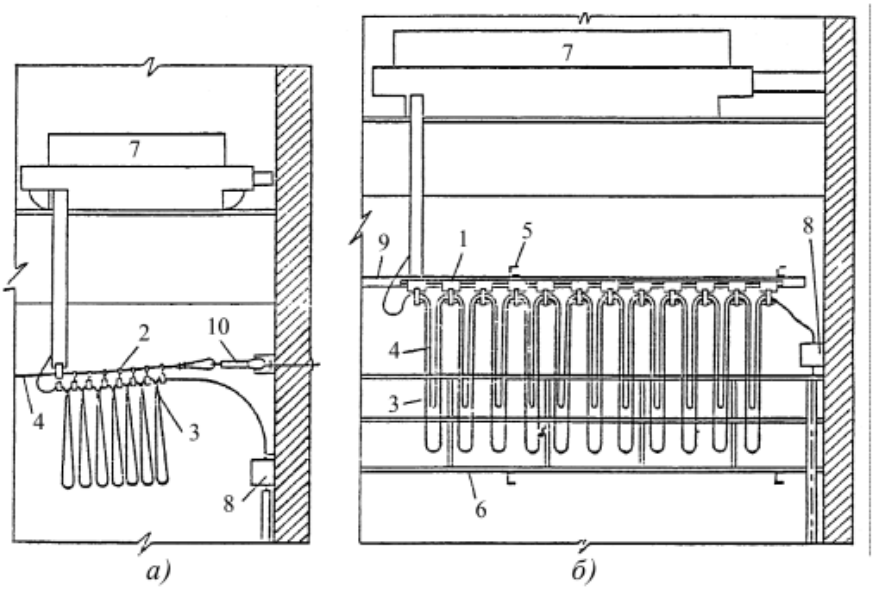
1- тролей, 2 - алюмінієва шина, 3 - тролейний ізолятор
Рисунок 6.37 - Вузли кріплення тролея з кутової сталі



1 - підкранова балка, 2 - опорна конструкція, 3 - тролей
Рисунок 6.38 - Прокладка тролеїв на підкранових балках

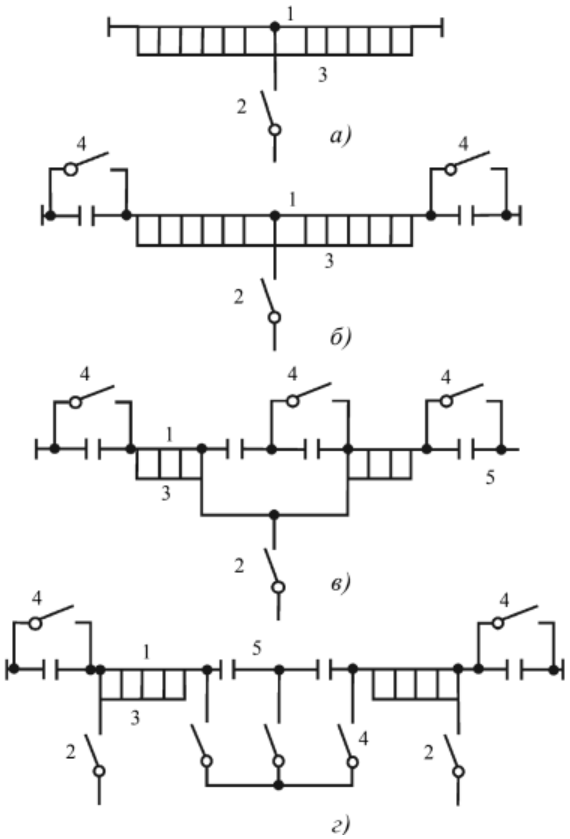


1- монорейка, 2 опорна конструкція, 3- тролейний ізолятор, 4 - тролей
Рисунок 6.39 - Прокладка тролеїв на монорейках тельферів



а) на скобах; б) на каретках. 1 - каретка, 2 - скоба, 3 - гнучкий кабель, 4 - струна, 5 - консоль, 6 - площадка для обслуговування, 7 - кран, 8 - коробка вводу, 9 - балка, 10 - натяжна муфта

Рисунок 6.40 - Живлення пересувних механізмів гнучким кабелем



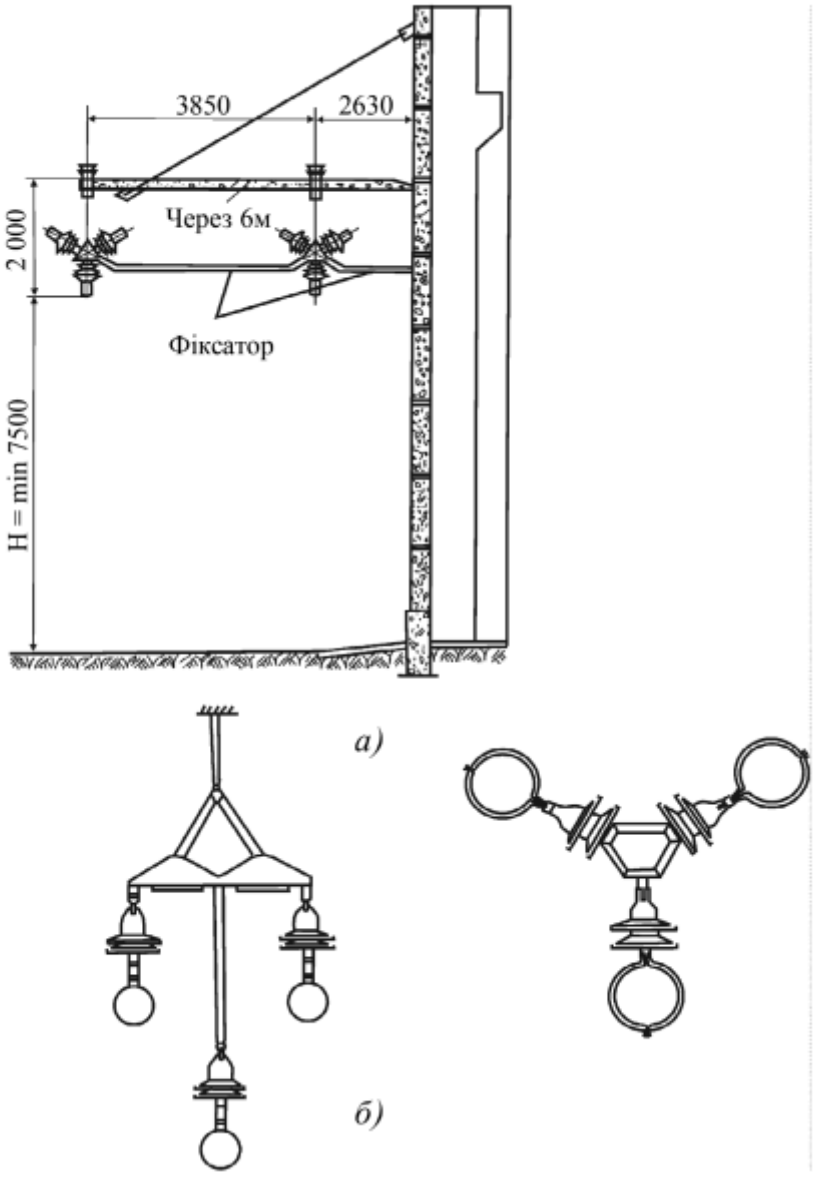
а) для одного крана; б) для двох кранів; в) для трьох та більше кранів; г) схема живлення від двох джерел. 1 - тролейна лінія, 2 - вимикач, 3 - лінія допоміжного живлення, 4 - секційний вимикач, 5 - ремонтна секція

Рисунок 6.41 - Схеми живлення тролейних ліній

Відкриті струмопроводи

Шинопроводи з жорстким ошинуванням використовують переважно при напругах 6 кВ і 10 кВ, а іноді напругою 35 кВ. Конструкції струмопроводів розрізняються розміщенням фаз, типом ізоляторів і їх кріпленням, матеріалом, формою та розміром шин (рис. 6.42).

Шини струмопроводів головним чином виготовляють з алюмінію або його сплавів. При струмах до 2 000 А пакет складається з плоских шин, а при більших струмах з шин швелерного профілю.



а) монтаж струмопроводу на кронштейні, що кріпиться до стінки корпусу;
б) кріплення фаз гнучкого струмопроводу

Рисунок 6.42 - Високовольтний струмопровід

Мережі вибухонебезпечних приміщень.

Світильники та двигуни по можливості слід монтувати за межами вибухонебезпечних приміщень.

У приміщеннях класу В-1, В-Ia повинні застосовуватися тільки мідні провідники.

Усі лінії захищаються від струмів КЗ та від перевантажень. Провідники до асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором вибираються за струмом 1.25 $I_{ном}$ двигуна (крім зон класу В-1б та В-Iг).

Забороняється застосовувати неізольовані провідники.

Гнучкий струмопровід виконується тільки гнучким кабелем з мідними жилами, гумовою ізоляцією та гумовою оболонкою.

Кабелі та провода з поліетиленовою ізоляцією чи оболонкою забороняється застосовувати у вибухонебезпечних приміщеннях усіх класів. Кабелі не повинні мати зовнішнього покриття з горючих матеріалів (джут, бітум та ін.). Також забороняється застосовувати з'єднувальні та відгалужувальні муфти.

Отвори у стінах, підлогах для проходу кабелю чи труби електропроводки щільно закривають негорючими матеріалами.

Забороняється застосовувати шинопроводи в приміщеннях класу В-1, В-Ir, В-II, В-IIa.

Зовнішні кабельні канали дозволяється споруджувати на відстані не менше 1,5 м від стін приміщень. Місця входу в приміщення засипаються піском по довжині не менше 1,5 м.

Дозволяється прокладка кабелів у блоках, але місця з'єднання блоків та отвори для виходу кабелів з блоку щільно закриваються негорючими матеріалами.

Кабельні тунелі на підприємствах з вибухонебезпечними зонами, як правило, не споруджуються. Рекомендується широке застосування естакад.

Нульові захисні провідники повинні знаходитися у спільній оболонці чи трубі з фазними провідниками.

Обладнання у приміщеннях класу В-1, BII застосовується тільки вибухобезпечне, в зонах класу В-Ia, В-Iг з підвищеною надійністю проти вибуху, в зонах В-1б, В-IIa зі ступенем захисту IP44 та IP54 відповідно.

Пошкодження кабельних ліній, випробування, діагностика та ремонт

Кабельні лінії напругою 0,4–10 кВ є одним із найнадійніших елементів електричних мереж, однак за умов тривалої експлуатації, впливу зовнішніх факторів і порушень технології монтажу в них можуть виникати пошкодження, які призводять до втрат електроенергії, коротких замикань або повного виходу лінії з ладу.

Основними завданнями експлуатаційного персоналу є своєчасне виявлення місць пошкоджень, визначення їхньої природи, проведення ремонтно-відновлювальних робіт та профілактичних заходів, які забезпечують надійну роботу кабельних мереж протягом усього життєвого циклу.

Види пошкоджень та їхні причини

Пошкодження кабельних ліній класифікують за характером впливу, місцем виникнення та фізичною природою дефекту.

1. Механічні пошкодження

- Порушення цілісності оболонки при земляних роботах, прокладанні трубопроводів, установці паль або бурінні.
- Деформації кабелю внаслідок перевищення допустимих радіусів вигину, натягів або зсувів ґрунту.
- Вібраційні навантаження від технологічного обладнання та транспортних засобів.
- Неправильне укладання без піщаної подушки або захисних плит.

2. Електричні пошкодження

- Міжфазні короткі замикання через пробій ізоляції.
- Пошкодження жил унаслідок надструмів або імпульсів перенапруги.
- Порушення екранування та заземлення, що викликає електрохімічну корозію.
- Часткові розряди (ЧР) в ізоляції кабелів із зшитого поліетилену (XLPE).

3. Термічні пошкодження

- Перегрів ізоляції при тривалому перевантаженні або поганих контактах у муфтах.
- Дія дугових розрядів при КЗ.
- Зміна структури матеріалу ізоляції внаслідок старіння під дією температури.

4. Вологісні пошкодження

- Проникнення вологи через мікрощілини в оболонці, негерметичні муфти або кабельні вводи.
- Зволоження паперової ізоляції в кабелях старих типів призводить до зниження електричної міцності.

5. Корозійні пошкодження

- Електрохімічна корозія свинцевих або алюмінієвих оболонок при наявності блукаючих струмів.
- Хімічна дія агресивних ґрунтів, нафтопродуктів, кислот або лугів.
- Недостатній захист катодними установками або відсутність ізоляційних покриттів.

6. Технологічні дефекти

- Недотримання технології монтажу муфт, недостатня зачистка жил, відсутність герметизації.
- Неправильний вибір кабелю за перерізом, типом ізоляції чи матеріалом оболонки.
- Недотримання норм ПУЕ при прокладанні в каналах або траншеях.

Випробування та оцінювання стану ізоляції.

Регулярні випробування ізоляції дозволяють оцінити поточний стан кабельної лінії, виявити дефекти до їхнього переходу у стадію аварії та визначити необхідність ремонту або заміни.

1. Вимірювання опору ізоляції

Проводиться мегомметром на напругу 1000…2500 В (для кабелів до 1 кВ) або 2500…5000 В (для кабелів 6–10 кВ).

Опір ізоляції повинен бути не менше:

- для кабелів 0,4 кВ – 1 МОм/км;
- для кабелів 6–10 кВ – 10 МОм/км.

Різке зниження опору свідчить про зволоження або старіння ізоляції.

2. Випробування підвищеною напругою

Здійснюють після монтажу, ремонту або періодично при експлуатації:

- Змінна напруга: перевірка електричної міцності ізоляції.
- Постійна напруга: дозволяє виявити витоки струму через ізоляцію.
- Імпульсна напруга: імітує грозові або комутаційні перенапруги.

3. Метод діелектричних втрат (tan δ)

Зміна значення тангенса кута діелектричних втрат характеризує ступінь старіння та зволоження ізоляції.

Допустиме значення:

- для кабелів зі зшитого поліетилену (XLPE) — $\tan \delta \leq 0{,}005$;
- для паперової ізоляції — $\tan \delta \leq 0{,}01$.

Перевищення показника свідчить про необхідність ремонту або заміни.

4. Імпульсна рефлектометрія (TDR)

Метод заснований на вимірюванні часу проходження електричного імпульсу до місця дефекту та його відбиття.

Дозволяє визначити відстань до місця пошкодження з точністю до 0,5–1 м.

5. Метод часткових розрядів

Застосовується для кабелів із полімерною ізоляцією. Визначається рівень ЧР у пікокулонах (пКл).

Наявність постійних часткових розрядів понад 10–20 пКл свідчить про дефект у зоні муфти чи жил.

6. Тепловізійна діагностика

Застосовується для виявлення локальних перегрівів у з'єднаннях, муфтах або місцях високого перехідного опору.

Метод безконтактний і дозволяє оперативно оцінити стан лінії без її відключення.

Методи виявлення та локалізації пошкоджень

При відмові кабельної лінії виконується комплекс дій:

1. Відключення пошкодженої лінії з обох сторін.
2. Перевірка наявності напруги.
3. Заземлення по черзі кожної фази.
4. Перевірка наявності напруги.
5. Вимірювання опору ізоляції для уточнення характеру дефекту (КЗ, обрив, пробій).
6. Імпульсне визначення відстані до місця пошкодження (рефлектометрія).
7. Акустичний метод — визначення дефекту за звуком електричного пробою під час випробування.
8. Індукційний метод — пошук траси кабелю та місця обриву за магнітним полем струму.
9. Термічний метод — за допомогою тепловізора або контактних термопар.

Комбінування цих методів дозволяє отримати точні координати дефекту без розкриття значних ділянок траси.

Методи ремонту та відновлення працездатності

1. Тимчасові заходи

- Установлення перемичок або байпасів для забезпечення живлення на час ремонту.
- Ізоляція пошкодженої жили термоусадковими матеріалами (у сухих місцях).

2. Поточний ремонт

- Вирізання дефектної ділянки та встановлення з'єднувальної муфти (епоксидної, термоусадкової, холодної заливки).
- Відновлення герметичності оболонки з використанням термоусадкових трубок або стрічок.
- Заміна кінцевих муфт, якщо виявлено зволоження або пробій у місці входу в обладнання.
- Перевірка опору ізоляції та фази після ремонту.

3. Капітальний ремонт

Проводиться у разі:

- множинних пошкоджень ізоляції;
- втрати електричної міцності по всій довжині кабелю;
- зношення понад 70 % ресурсу.

Передбачає повну заміну секції кабелю, оновлення муфт, відновлення піщаної подушки та сигнальної стрічки.

4. Відновлення захисту від корозії

- Очищення та повторне нанесення бітумно-полімерного покриття.
- Установлення катодного захисту для кабелів із металевими оболонками.
- Контроль потенціалу та стану ґрунту в зонах блукаючих струмів.

Профілактичне обслуговування

Регламентні роботи мають проводитися відповідно до інструкцій ПБЕЕС і ПУЕ:

- Періодичність огляду КЛ напругою до 35 кВ

Траси кабелів, прокладених у землі – 3 міс.

Траси кабелів, прокладених під удосконаленим покриттям на території міст – 12 міс.

Траси кабелів, прокладених у колекторах, тунелях, шахтах і на залізничних мостах – 6 міс.

Кабельні колодязі – 6 міс.

- Вимірювання опору ізоляції — раз на 12 місяців.
- Перевірка муфт і кінцевих з’єднань — перед опалювальним сезоном або після аварії.
- Випробування підвищеною напругою — раз на 3–5 років (для 6–10 кВ).
- Контроль стану ґрунту, глибини прокладки, стану попереджувальних плит.
- Актуалізація виконавчих схем трас кабелів.

Висновки

1. Системи каналізації електричної енергії на промислових підприємствах включають широкий спектр способів прокладання електричних мереж — від проводів і кабелів до шинопроводів і струмопроводів. Вибір конкретного рішення залежить від призначення мережі, умов середовища та вимог до надійності.

2. Основні типи електропроводок — струнні, тросові, у коробах, лотках і трубах. Вони відрізняються рівнем механічного захисту, трудомісткістю монтажу та можливістю індустріалізації процесу.

3. При проектуванні цехових мереж важливо враховувати вимоги ПУЕ щодо розміщення апаратів захисту, зокрема у місцях зміни перерізу провідників, приєднання відгалужень і у вибухонебезпечних зонах.

4. Кабельні лінії (ЛЕП) — основний засіб передачі електроенергії всередині підприємства. Вони можуть прокладатися відкрито на конструкціях, у траншеях, каналах, тунелях, естакадах і блоках, кожен спосіб має свої технічні та економічні переваги.

5. Конфігурація систем живлення залежить від потужності підприємства:

- до 100 кВт — одиночна лінія;
- до 1 МВт — кільцева міська мережа;
- до 10 МВт і більше — дволанцюгові або комбіновані схеми з резервуванням.

6. У великих промислових цехах застосовують високовольтні струмопроводи та комплектні шинопроводи (ШМА, ШРА), що забезпечують гнучкість монтажу, компактність і високу надійність системи.

7. Особливу увагу приділено тролейним і освітлювальним шинопроводам, які забезпечують живлення рухомих механізмів (крани, тельфери) та систем освітлення.

8. Для вибухонебезпечних приміщень передбачені суворі вимоги до вибору матеріалів, ізоляції, апаратури та методів монтажу. Заборонено використання горючих матеріалів, поліетиленової ізоляції, шинопроводів та муфт.

9. Правильний вибір схеми, способу прокладки і типу обладнання дозволяє забезпечити надійність, безпеку, економічність і довговічність систем електропостачання промислових підприємств.

10. Найпоширенішими причинами пошкоджень є механічні дії при земляних роботах, вібрації, старіння ізоляції, волога, перегрів, електричні перенапруги та корозія металевих оболонок.

11. Діагностика стану ізоляції включає вимірювання опору ізоляції, випробування підвищеною напругою, аналіз діелектричних втрат (tan δ), рефлектометрію, тепловізійний контроль та визначення рівня часткових розрядів.

12. Своєчасна діагностика дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях, мінімізувати аварійність і забезпечити прогнозування ресурсу кабельних ліній.

13. Ремонтні роботи поділяються на поточні (заміна муфт, локальне відновлення оболонки), капітальні (заміна секцій) та профілактичні (перевірка, очищення, антикорозійний захист).

14. Після ремонту обов’язково проводяться електричні випробування для перевірки якості виконаних робіт і підтвердження відновлення ізоляційної міцності.

15. Профілактичне обслуговування (вимірювання опору ізоляції, тепловізійний контроль, перевірка муфт) є ключовим чинником довговічності кабельних мереж і запобігання аваріям.

16. Комплексний підхід — правильний вибір конструкції кабелю, якісний монтаж, регулярна діагностика та своєчасний ремонт — забезпечує надійність і довговічність кабельних ліній, зменшує втрати електроенергії та ризики простоїв обладнання.

Контрольні питання

1. Які основні види електропроводок застосовуються на промислових підприємствах?
2. У яких випадках доцільно використовувати тросові електропроводки?
3. Які переваги має прокладання кабелів у лотках і коробах порівняно з трубами?
4. Які вимоги ПУЕ висуваються до встановлення апаратів захисту у цехових мережах?
5. Які переваги має кабельна лінія у порівнянні з повітряною?

6. Назвіть основні способи прокладання кабелів у промислових мережах.

7. У чому полягає різниця між радіальною, магістральною та комбінованою схемами розподільчих мереж?

8. Для яких категорій електроприймачів застосовується подвійна магістраль?

9. Які переваги має використання шинопроводів типу ШМА та ШРА у порівнянні з традиційними кабельними мережами?

10. У яких випадках доцільно застосовувати високовольтні струмопроводи?

11. Які особливості конструкції тролейних шинопроводів і для чого вони призначені?

12. Які вимоги висуваються до електромереж у вибухонебезпечних приміщеннях?

13. Які матеріали заборонено використовувати для ізоляції кабелів у вибухонебезпечних зонах?

14. Які заходи необхідно передбачити при прокладанні кабелів у тунелях і блоках?

15. Які критерії визначають вибір конфігурації мережі живлення промислового підприємства?

16. Назвіть основні види пошкоджень кабельних ліній і поясніть їхні причини.

17. Які електричні методи використовують для діагностики стану ізоляції кабелів?

18. У чому полягає суть методу імпульсної рефлектометрії (TDR)?

19. Що показує величина тангенса кута діелектричних втрат tan δ і як вона використовується для оцінки стану ізоляції?

20. Як визначається місце пошкодження кабелю при міжфазному короткому замиканні?

21. Які основні види випробувань проводять після монтажу або ремонту кабельних ліній?

22. Назвіть послідовність дій при локалізації пошкодження кабельної лінії.

23. У яких випадках проводиться капітальний ремонт кабельної лінії?

24. Які вимоги слід дотримуватись при заміні з’єднувальних і кінцевих муфт?

25. Які заходи застосовуються для захисту металевих оболонок кабелів від корозії?

26. Як часто необхідно проводити вимірювання опору ізоляції кабельних ліній?

27. Які основні переваги застосування тепловізійного контролю під час експлуатації кабелів?

28. Які типові нормативи опору ізоляції для кабелів напругою 0,4 кВ і 10 кВ?

29. Які основні заходи забезпечують довговічність і безпеку кабельних мереж у промислових умовах?

Використана література

1. Електричні системи і мережі. Частина 1 : навчальний посібник / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський ; за ред. П. Д. Лежнюка. Вінниця : ВНТУ, 2020. 200 с.

2. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств : підручник. Вінниця : Нова Книга, 2004. 656 с.

ТЕМА 7. РОЗПОДІЛЬЧІ ПРИСТРОЇ 0,4–10 КВ: КОНСТРУКЦІЯ, ВИМОГИ ДО ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ОРГАНІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТ

Будова та призначення розподільчих пристроїв. Конструктивні особливості комірок, вимикачів, шин та контактних з'єднань. Організація технічного обслуговування й ремонтних робіт.

Класифікація розподільних установок

Розподільна установка – це сукупність електрообладнання, призначеного для приймання і розподілу електричної енергії одного класу напруги. Розподільна установка містить набір комутаційних апаратів, збірні та з'єднувальні шини, допоміжні пристрої РЗіА, засоби обліку та вимірювання.

Розподільні установки класифікуються за призначенням: комплектні розподільчі пристрої (КРУ); збірні розподільчі пристрої.

Комплектна розподільна установка (КРУ) – це розподільна установка, що складається із закритих шаф з апаратами, вимірювальних й захисних приладів й допоміжних пристроїв, що вбудовані в них. Шафи повністю зібрані на заводі, і готові до роботи одразу після встановлення. Комплектні установки в порівнянні зі збірними конструкціями електротехнічних установок мають наступні основні переваги: менші обсяги будівельномонтажних робіт; економія трудовитрат; більша надійність і безпека при їх обслуговуванні; менші експлуатаційні витрати; зручність і швидкість при реконструкції; менші терміни проектування.

За місцем розташування – відкриті та закриті. Відкриті розподільні установки (ВРУ) – розподільні установки, у яких силові провідники розташовуються на відкритому повітрі без захисту від впливу навколишнього середовища. Зазвичай у вигляді ВРУ виконуються розподільні установки на напругу від 27,5 кВ.

Закриті розподільні установки (ЗРУ) – розподільні установки, обладнання яких встановлюється в закритих приміщеннях, або захищене від контакту з навколишнім середовищем спеціальними кожухами (в т. ч. шафи КРУЗ – комплектні розподільні установки зовнішнього виконання). Зазви чай такі розподільні установки застосовують на напруги до 35 кВ. Застосування ЗРУ високих напруг доцільно: у місцевості з агресивним середовищем (морське повітря, підвищене запилення), холодним кліматом, при будівництві в обмежених умовах, у міських умовах для зниження рівня шуму та для архітектурної естетичності.

Відкрита розподільна установка.

Відкрита розподільна установка (ВРУ) – розподільна установка, обладнання якої розташовується на відкритому повітрі і призначена для прийому та розподілення електроенергії трифазного змінного струму частотою 50 Гц номінальною напругою 35-220 кВ. ВРУ використовуються для комплектування блочних трансформаторних підстанцій (КТПБ) на-

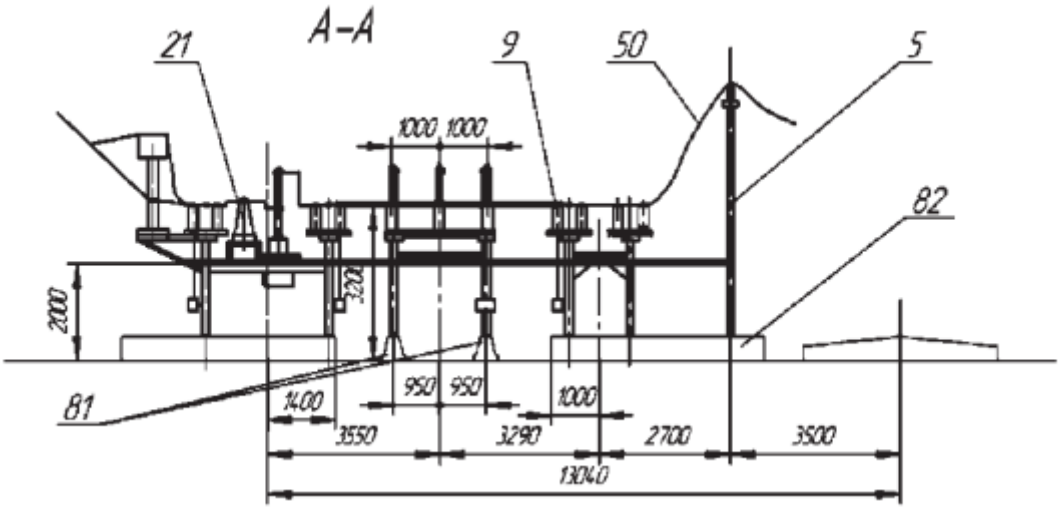
пругою 35-220 кВ. Відкриті розподільні установки виконуються з уніфікованих транспортабельних блоків заводського виготовлення, що складаються з металевого каркасу і змонтованим на ньому високовольтним обладнанням, елементами ошинування та додаткових кіл. Ошинування ВРУ здійснюється з труб алюмінієвого сплаву. Кожний блок представляє собою шафу відкритої розподільної установки та виконує функції приєднання. Обладнання ВРУ монтується на попередньо спроектований та підготовлений майданчик зі змонтованим фундаментом. Кабелі допоміжних кіл на території ВРУ прокладаються в підвісних металевих лотках із збірного залізобетону. Для забезпечення безпеки виробництва ремонтних робіт на блоках приєднань ВРУ 35-220 кВ струмопровідні частини, що знаходяться під напругою. Територія обов'язково огороджується. Такі розподільні установки мають переваги, а саме: можливість застосовувати габаритні елементи ВРУ на високих класах напруги; виготовлення ВРУ не потребує додаткових витрат на будівництво приміщень; зручність при розширенні та модернізації; можливе візуальне спостереження всіх апаратів ВРУ.

Недоліки: експлуатація ВРУ затруднена в несприятливих кліматичних умовах, крім того, навколишнє середовище сильніше впливає на елементи ВРП, що призводить до їх раннього зносу; більші габарити ВРУ ніж ЗРУ.

Відкриті ВРУ (рис. 7.1 та рис. 7.2) входять до складу комплектних трансформаторних підстанцій 35-220 кВ.

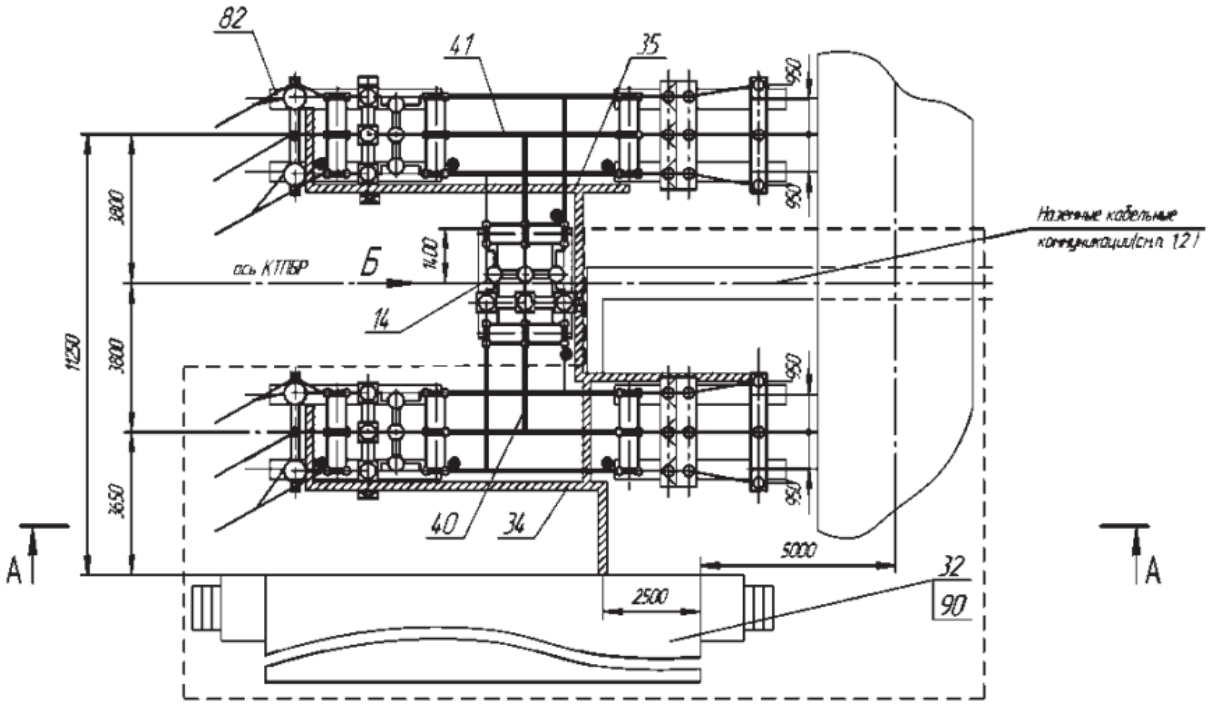
Таблиця 7.1 - Технічні характеристики ВРУ 35-220 кВ

Найменування параметру	Клас напруги ВРУ			
Номінальна напруга, кВ	35	110	150	220
Найбільша робоча напруга, кВ	40,5	126	172	252
Номінальний струм, А:				
- головних кіл	630	630	630	630
- збірних шин	1000	1000, 2000	1000, 2000	1000, 2000
Ударний струм короткого замикання, кА	52	52	52	65, 81
Струм термічної стійкості протягом 3 с, кА	20	20	20	20, 31,5
Номінальна напруга допоміжних кіл, В:				
- змінного струму	380/220	380/220	380/220	380/220
- постійного струму	220	220	220	220
- трансформаторів напруги	100	100	100	100



5- блок опорних ізоляторів 35 кВ; 9 блок шиних апаратів 35 кВ; 21- блок вимикача 35 кВ; 50 шина; 81, 82 лежень

Рисунок 7.1 - Розріз А-А модуля ВРУ 35 кВ



14 – блок вимикача 35 кВ; 32 – загальнопідстанційний пункы керування; 34, 35 – розкладка кабельної конструкції; 40, 41– ошиновка ОРУ 35 кВ; 90 – фундамент

Рисунок 7.2 - Вид зверху модуля ВРУ 35 кВ

Закриті розподільні установки

У деяких випадках для ЗРУ використовується те ж обладнання, що і для ВРУ, але з розміщенням усередині приміщення. Типовий клас напруги: 35-110 кВ, рідше 220 кВ. Більш практично застосувавати для ЗРУ

спеціальне обладнання. На напругу до 35 кВ виготовляють РП у вигляді шаф, що сполучаються боковими стінками в загальний ряд. У таких шафах елементи з напругою до 1 кВ виконують проводами в твердій ізоляції, а елементи від 1 до 35 кВ – провідниками з повітряної ізоляцією. В ЗРУ напругою вище 35 кВ повітряна ізоляція не застосовується, а модулі різного технологічного призначення розміщуються у середині корпусів, що заповнюється еле5 газом (КРУЕ).

Комплектні розподільні установки серії КУ-10Ц, К30, К-35 (ТОВ ВС РЗВА).

КРУ серії КУ-10Ц комплектуються вакуумними вимикачами ВР1 і ВР2. КРУ серії КУ-10 комплектуються вакуумними вимикачами ВР3, або вакуумними вимикачами VD4 (виробництва АВВ) або елегазовими вимикачами LF (виробництва Schneider Electric).

Надійність шаф за механічним і комутаційним ресурсом визначається параметрами встановлених вимикачів, і для шаф з вимикачами серій ВР становить:

- механічний ресурс – до 100 000 циклів;
- комутаційний ресурс при номінальному струмі – до 50 000 цикл;
- комутаційний ресурс при номінальному струмі вимкнення – до 100 вимкнень.

Шафи з вакуумними вимикачами комплектуються обмежувачами пуренапруг типів Polim D (виробництва АВВ) або ОПНС. Велика кількість типовиконань і висока універсальність шаф КРУ серій КУ-10Ц і КУ-10 дозволяє застосовувати їх як при будівництві нових, так при реконструкції або нарощуванні потужності діючих розподільних установок 6-10 кВ будь-якої складності:

– одностороннє обслуговування і малі габаритні розміри шаф дозволяють розмістити РП на будівельній площі мінімальних розмірів;

– за схемними рішеннями шафи КУ-10Ц, спільно з КУ-10, можуть замінити як шафи більшості старих серій, так і шафи, що виробляються наразі;

– КУ-10ЦІ КУ-10 можуть стикуватися по збірних шинах з шафами інших серій, від будь-яких виробників, за допомогою перехідних шаф;

– великий вибір схем допоміжних з'єднань, як на змінному, так і на постійному оперативному струмі:

– схеми допоміжних з'єднань виконуються як на традиційних реле, так і з використанням сучасних мікропроцесорних пристроїв;

– схеми обліку активної і реактивної енергії виконуються як з використання звичайних, так і багатотарифних програмованих лічильників;

– можливість інтеграції в інформаційно-комп'ютерні системи контролю та управління, завдяки використанню пристроїв мікропроцесорного релейного захисту.

Комплектні розподільні установки внутрішнього встановлення серії КУ-10Ц (рис. 7.3) призначені для прийому і розподілу електроенергії

трифазного змінного струму з частотою 50 і 60 Гц і номінальною напругою 6-10 кВ в системах з ізольованою або частково заземленою нейтраллю. КРУ серій КУ10Ц використовуються в розподільних установках власних потреб електростанцій всіх видів, на електричних підстанціях, в електроустановках підприємств всіх галузей промисловості, заліз ниць і метрополітенів.

В залежності від призначення і виду комплектації шафи можуть бути з викотним елементом або без нього. Вибір схем головних з'єднань визначає наявність або відсутність фасадних дверей: КРУ серії КУ- 10Ц на струми від 1600 А до 3150 А мають підйомноповоротні двері оригінальної конструкції; шафи на номінальні струми 2000 А і 3150 А (струм відключення 31,5 кА) мають укорочені фасадні двері і фартух, який опускається при переміщенні викотного елементу.

Рисунок 7.3. Зовнішній вигляд комірки комплектного розподільного пристрою серії КУ-10Ц

Шафи серії КУ-10Ц можуть виготовлятися як з одностороннім так і з двостороннім обслуговуванням. Комутаційні апарати. КРУ серії КУ-10Ц комплектуються вакуумними вимикачами ВРІ, ВР2 і ВР3. Ці вимикачі розраховані на роботу при номінальних струмах до 3150 А і номінальних струмах вимкнення до 40 кА. Апарати мають комутаційні ресурси до 50 000 циклів ВВ при номінальних струмах, і 100-при номінальних струмах вимкнення.

Комплектні розподільні установки внутрішньої установки серії КУ-10С призначені для роботи в мережах трифазного змінного струму, класу напруги 6; 10 кВ частоти 50 і 60 Гц у системах з ізольованою або заземленою через дугогасний реактор або активний опір нейтраллю. Шафи КРУ серії КУ-10С (рис. 7.4.) створені для установки в розподільні установки електричних станцій всіх видів, на електричних підстанціях і в електроустановках промислових підприємств.

Рисунок 7.4. Комплектна розподільна установка серії КУ-10С

Таблиця 7.2 – Основні технічні характеристики КУ10Ц

Параметр	Значення параметра
Номінальна напруга, кВ	6; 10
Найбільша робоча напруга, кВ	7,2; 12
Номінальний струм головних з'єднань , А	630; 1 000; 1 600; 2 000; 2 500; 3 150
Номінальний струм збірних шин, А	1 000; 1 600; 2 000; 2 500; 3 150
Номінальний струм вимкнення вимикача, кА	20; 31,5
Струм термічної стійкості, кА (3 с)	20; 31,5
Струм електродинамічної стійкості, кА	51; 81
Номінальна напруга допоміжних кіл змінного струму, В	220
Номінальна напруга допоміжних кіл постійного (випрямленого) струму, В	220
Габаритні розміри, мм	
- ширина	750; 900
- глибина	1 000; 1 200; 1 300
- висота	2 000
Маса, кг	560 -1 250

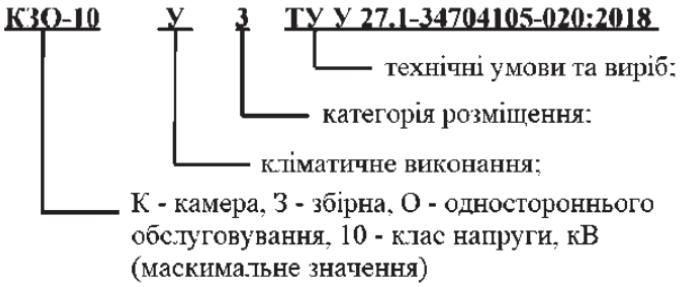
Конструкція шафи КРУ представляє собою металоконструкцію, виготовлену зі сталі з алюцинковим покриттям. З'єднання виконані на посилених сталевих витяжних заклепках і різьбових з'єднаннях.

Комутаційні апарати. Для встановлен-ня в КУ-10С використовується серія вакуумних вимикачів ВРС, а також вимикачі HD4 і VD4. Вимикачі серії ВРС-10 розраховані на роботу при номінальних струмах до 4 000 А і номінальних струмах вимкнення до 40 кА. Апарати ВРС-10 мають комутаційні ресурси до 50 000 циклів ВВ при номінальних струмах, і 100 при струмах вимкнення.

Камери збірні одностороннього обслуговування серії КЗО-10 (рис. 7.5) внутрішньої установки, призначені для використання в розподільних установках власних потреб електростанцій усіх видів, на електропідстанціях, в електроустановках промислових підприємств та на об'єктах загальнопромислового, сільскогосподарського призначення. Камери призначені для роботи в мережах трифазного змінного струму, класу напруги 6; 10 кВ і частоти 50 Гц, на номінальні струми 630 1250 А, зі струмом вимикання 20 кА для систем з ізольованою або заземленою через дугогасний реактор або активний опір нейтраллю. Кліматичне виконання камер – У категорії 3.

Рисунок 7.5 - Комплектна розподільна установка серії КЗО-10

Структура умовного позначення серії КЗО:

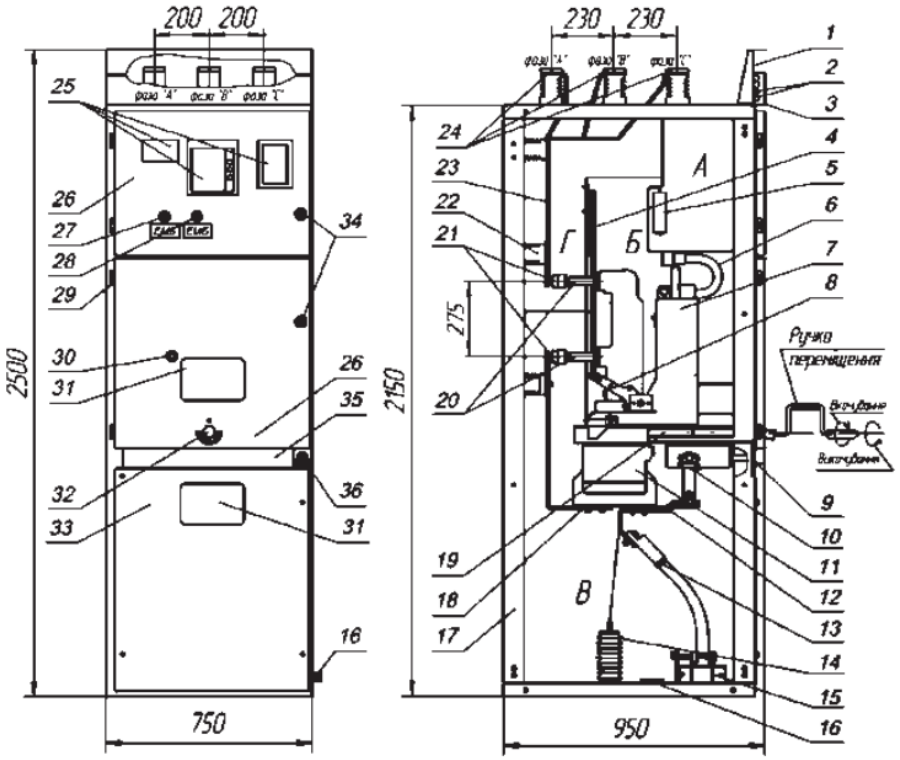


У якості базової комплектації камер за-стосовуються:

- вимикач вакуумний: ВРС;
- вимикач навантаження: ВНР;

- трансформатори струму типів: ТОЛУ;
- трансформатори напруги типів:IVS1F; IVD (ф. Beontop);
- трансформатор власних потреб: ТСКС;
- - обмежувачі перенапруги: ОПНп;
- трансформатори струму нульової послідовності: ТЗЛУ;
- запобіжники силові (патрони): ПКТ і ін.

Габаритні, установочні та приєднувальні розміри лінійної шафи КЗО-10 показані на рис. 7.6.



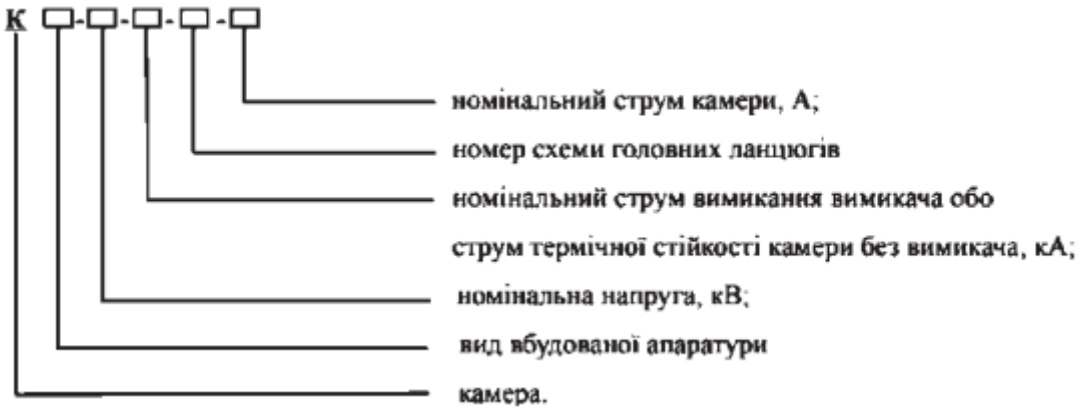
А - відсік релейний; Б — відсік висувного елементу; В - відсік лінійних шин та ТС; Г — відсік відпайок збірних шин 1-перегородка, 2 – кабелі; 3 кожух; 4 - механізм шторочний; 5 — отвір міжрелейного зв'язку; 6 - джгут; 7 - висувний елемент; 8 — привод механізму шторного; 9 — перегородка легкозємна; 10 - заземлювач; 11 — ТС; 12 — контакт; 13 — кабель силовий; 14 — ОПН; 15 — ТС нульової послідовності; 16 шина заземлення магістральна; 17 — каркас; 18 — відпайка ТС; 19 — напрямні; 20 контакти втичні рухомі; 21 контакти втичні нерухомі; 22 — ізолятор опорний; 23 — відпайка збірних шин; 24 шина збірна; 25 - елементи РЗА; 26 - двері; 27 кнопка ЕМБ висувного елемента; 28 кнопка ЕМБ заземлювача; 29 — завіси дверей; 30 — отвір аварійного вимкнення вимикача пружинним приводом; 31 - вікно оглядове; 32 —отвір ручки переміщення висувного елементу; 33 — перегородка фасадна; замок дверей; 35— перегородка легкозємна; 36 — отвір ручки вмикання-вимикання заземлювача

Рисунок 7.6 - Габаритні, установочні, приєднувальні розміри камери КЗО-10

Таблиця 7.3 – Основні параметри камер КЗО

Параметр	Од. виміру	Значення
Номінальна напруга	кВ	6; 10
Номінальний струм головних ланцюгів	А	400, 630; 1000; 1250
Номінальний струм головних ланцюгів з запобіжником	А	20, 31,5; 40; 50; 80; 100; 125; 160
Частота	Гц	50
Номінальний струм збірних шин	А	630; 1000; 1250
Номінальний струм вимикання вимикача, вбудованого в камеру	кА	20; 0,63
Струм термічної стійкості	кА	20
Проміжку часу термічної стійкості	с	3;1
Номінальний струм електродинамічної стійкості головних ланцюгів камер	кА	51
Номінальна напруга вторинних ланцюгів: - змінного струму; - постійного (випрямленого) струму	В	 -220 -220
Тривалість термічної стійкості блокуючих електромагнітів заземлювача та висувного елемента	с	Не більше 60

Умовне позначення типовиконання камери в залежності від вбудованої в неї апаратури або приєднання та його роз шифровка:



Приклади запису умовного позначення К30:

КВВ-10-20-01-630 -камера з вимикачем вакуумним напругою 10 кВ, номінальний струм вимикання 20 кА, виконана по схемі головних кіл 01 з номінальним струмом 630 А.

КШР-10-20-101-1000 камера з шин-ним роз'єднувачем напругою 10 кВ, номінальний струм термічної стійкості 20 кА, виконана по схемі головних кіл 101 з номінальним струмом 1000 А.

ШШП-10-20-720-1000-2000 - шинопровід шинної перемички напругою 10 кВ, номінальний струм термічної стійкості 20 кА, виконаний по схемі головних кіл 720 з номінальним струмом 1000 А, з відстанню між фасадами 2000 мм.

Таблиця 7.4 – Класифікація виконання камер.

Найменування показників класифікації	Виконання
Рівень ізоляції	нормальний
Наявність ізоляції струмоведучих частин	з не ізольованими шинами
Наявність висувних елементів в камерах	з висувними елементами; без висувних елементів
Від лінійних високовольтних приєднань	1. Шинні 2. Кабельні 3-з фазні до 240 мм кв. до 2 шт; до 12 шт в ККС 3. Кабельні 1-но фазні до 185 мм кВ. до 2-х шт.; до 10 шт. на фазу в ККС
Умови обслуговування	з одностороннім обслуговуванням
Тип основних камер в залежності від вбудованої апаратури і приєднання	КВВ - з вимикачем вакуумним КВН - з вимикачем навантаження КШР - з шинним роз'єднувачем КТН - з трансформаторами напруги ККС - з кабельними збірками КГВ - з глухим вводом (шинним) КСТ - з трансформатором власних потреб КПС - з силовими запобіжниками КЗЗШ- з заземлювачем збірних шин
Тип вбудованого вимикача	ВРС, ВНР
Вид управління	Місцеве, дистанційне
Типи шинопроводів	ШШВ- шино проводи шинного вводу від стіни на камеру ШШП - шино провід шинної перемички між рядами камер по збірним шинам

Комплектні розподільні установки внутрішнього установлення серії КУ35 призначені для прийому і розподілу електроенергії трифазного змінного струму з частотою 50 і 60 Гц і номінальною напругою 35 кВ

Шафи серії КУ35 (рис. 7.7) призначені для використання як у складі комплектних трансформаторних підстанцій, так і як самостійної розподільної установки внутрішнього встановлення.

Всі металеві вузли і деталі шафи виконані зі сталевих листів. З'єднання всіх елементів здійснюється болтами і гайками типу М8.

Комутаційні апарати. КРУ серії КУ35 комплектуються вакуумними вимикачами ВР35 з литими полюсами з епоксидного компаунда. Вимикачі розраховані на робо ту при номінальних струмах до 3150 А і номінальних струмах вимкнення до 31,5 кА.

Апарати мають комутаційні ресурси до 30 000 циклів ВВ при номінальних струмах і 50 при струмах вимкнення.

Рисунок 7.7. Комплектний розподільний пристрій серії КУ35

Таблиця 7.5. Основні технічні характеристики КУ35

Параметр	Значення
Номинальна напруга, кВ	35
Найбільша робоча напруга, кВ	40,5
Номінальний струм головних кіл шаф, А	630; 1 000; 1 600; 2 500; 3 150
Номінальний струм збірних шин, А	1 000; 1 600; 3 150
Номінальний струм вимкнення вимикача, кА	20; 25; 31,5
Номінальний струм електродинамічної стійкості головних кіл, кА	51; 81
Габаритні розміри, мм	
ширина	1 500
глибина	2 800; 3 150*
висота	2 532
Маса, кг	не боільше 2000

Розподільні установки типу NXAIR (компанії Siemens AG)

NXAIR - це розподільна установка середньої напруги до 40,5 кВ в металевому корпусі для внутрішнього встановлення з класифікацією за стійкістю до внутрішньої дуги до 50 кА, при тривалості горіння дуги впродовж 1 сек.

Розподільна установка середньої напруги NXAIR (рис. 7.8) до 17,5 кВ, до 40 ка випускається для підприємств електропостачання та різних

промислових підприємств. Перевагами NXAIR є: безпека персоналу, висока експлуатаційна надійність і зручність в роботі; компактні розміри, мінімальна кількість компонентів, що вимагають технічного обслуговування; приводний механізм.

Рисунок 7.8 - Комплектний розподільний пристрій NXAIR компанії «Siemens» до 40,5 кВ

Таблиця 7.6 - Технічні характеристики NXAIR (компанії «Siemens»)

Параметр	Од. виміру	Значення			
Номінальна напруга	кВ	7.2	12	15	17,5
Номінальна частота	Гц	50/60	50/60	50/60	50/60
Номінальна однохвилинна випробувальна напруга промислової частоти	кВ	20 (32)	28 (42)	36	38
Номінальна напруга грозового імпульсу	кВ	60	75	95	95
Номінальний короткочасний струм, 3 сек	кА	40	40	40	40
Номінальний піковий струм 50 Гц / 60 Гц	кА	100/104	100/104	100/104	100/104
Номінальний струм вимикання КЗ	кА	40	40	40	40
Номінальний струм вмикання КЗ	кА	100/104	100/104	100/104	100/104
Номінальний струм збірних шин	А	4000	4000	4000	4000
Номінальний струм фідерів	А	4000	4000	4000	4000

Розподільна установка середньої на5 пруги NXAIR (рис. 7.9) до 17,5 кВ для 50 кА застосовується в різних галузях промисловості та в окремих областях виробництва і розподілу електроенергії. Розподільна установка також може застосовуватися як генераторна КРУ до 15 кВ на всіх типах електростанцій шляхом установки вакуумних вимикачів.

Рисунок 7.9 - Комплектна розподільна установка NXAIR компанії «Siemens» до 17,5 кВ

Таблиця 7.7 - Технічні характеристики NXAIR до 17,5 кВ, 50 кА, до 4000 А

Параметр	Од. виміру	Значення			
Номінальна напруга	кВ	7,2	12	15	17,5
Номінальна частота	Гц	50/60	50/60	50/60	50/60
Номінальна однохвилинна випробувальна напруга промислової частоти	кВ	20 (32)	28 (42)	36	38
Номінальна напруга грозового імпульсу	кВ	60	75	95	95
Номінальний короткочасний струм, 3 сек	кА	50	50	50	50
Номінальний піковий струм 50 Гц / 60 Гц	кА	125/130	125/130	125/130	125/130
Номінальний струм вимикання КЗ	кА	50	50	50	50
Номінальний струм вмикання КЗ	кА	125/130	125/130	125/130	125/130
Номінальний струм збірних шин	А	4000	4000	4000	4000
Номінальний струм фідерів	А	4000	4000	4000	4000

Розподільна установка середньої напруги NXAIR M 24 кВ до 25 кА призначені для підприємств електропостачання, об’єктів інфраструктури та промислових підприємств.

Таблиця 7.8 - Технічні характеристики NXAIR M 24 кВ, до 25 кА

Параметр	Од. виміру	Значення
Номінальна напруга	кВ	24
Номінальна частота	Гц	50/60
Номінальна однохвилинна випробувальна напруга промислової частоти	кВ	50 (65)
Номінальна напруга грозового імпульсу	кВ	125
Номінальний короткочасний струм, 3 сек	кА	25
Номінальний піковий струм 50 Гц / 60 Гц	кА	63/65
Номінальний струм вимикання КЗ	кА	25
Номінальний струм вмикання КЗ	кА	63/65
Номінальний струм збірних шин	А	2500
Номінальний струм фідерів	А	2500

Розподільна установка середньої напруги NXAIR S 40,5 кВ, до 31,5 кА призначені для підприємств електропостачання, об'єктів інфраструктури та промислових підприємств.

Таблиця 7.9 - Технічні характеристики NXAIR M 24 кВ, до 25 кА

Параметр	Од. виміру	Значення
Номінальна напруга	кВ	40,5
Номінальна частота	Гц	50/60
Номінальна однохвилинна випробувальна напруга промислової частоти	кВ	95
Номінальна напруга грозового імпульсу	кВ	190
Номінальний короткочасний струм, 3 сек	кА	31,5
Номінальний піковий струм 50 Гц / 60 Гц	кА	80
Номінальний струм вимикання КЗ	кА	31,5
Номінальний струм вмикання КЗ	кА	80
Номінальний струм збірних шин	А	3150
Номінальний струм фідерів	А	2500

КРУ типу SIMOSEC (ф. Siemens AG)

SIMOSEC (рис. 7.10) до 24 кВ; 25 кА; струм збірних шин 1250 А, струм фідерів 1250 А:

– металевий корпус;
– одинарна система збірних шин;
– технологія повітряної ізоляції в поєднанні з функціями комутації в газовій ізоляції.

Переваги:

– безпека експлуатації та надійність;
– безпека персоналу;
– компактна конструкція;
– економічність, екологічність

Рисунок 7.10. Комплектний розподільний пристрій SIMOSEC до 24 кВ (компанії Siemens)

Таблиця 7.10 - Технічні характеристики SIMOSEC до 24 кВ; 25 кА

Параметр	Од.виміру	Значення				
Номінальна напруга	кВ	7,2	12	15	17,5	24(25)
Номінальна частота	Гц	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60
Номінальна змінна випробувальна напруга промислової частоти	кВ	20	28(42)	36	38	50
Номінальна випробувальна напруга грозового імпульсу	кВ	60	75	95	95	120
Номінальний короткочасний струм, 3 сек	кА	21	21	21	21	21
Номінальний короткочасний струм, 2 сек	кА	25	25	25	25	25
Номінальний робочий струм	кА	63,65	63,65	63,65	63,65	63,65
Номінальний струм вимкнення при КЗ	кА	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5
Номінальний струм КЗ	А	63, 65	63, 65	63, 65	63, 65	63, 65
Номінальний оптимальний струм збірних шин	А	630	630	630	630	630
Номінальний струм фідерів	А	1250	1250	1250	1250	1250

Розподільні пристрої серії UniSec, SafeRing (ф. ABB Ltd).

Розподільні пристрої середньої напруги з повітряної ізоляцією. Для вторинного розподілу електроенергії використовуються КРУ АВВ серії UniSec (рис 7.11), оснащені вимикачами, вимикачами навантаження і запобіжниками. Знімні і викатні вакуумні та елегазові вимикачі. Широкий асортимент захисних реле сучасного технічного рівня, вбудованих в знімні вимикачі або окремо розташовані, що виконують функції захисту, контролю та вимірювання. Кожна комірка повністю виконана з оцинкованого металевого листа і складається з різних відсіків. Кріпиться до підлоги і закриває обладнання пластиною з отворами для проходження кабелів середньої напруги.

Кожна комірка (рис. 7.12) складається з декількох силових відсіків: відсік кабелів 8, відсік шин 4, відсік апаратів 9. Відсіки відокремлені один від одного металевими перегородками, вимикачем на вантаження, багатофункціональним апара5 том або металевими шторками (або ізольованими якщо на 24 кВ) 10 в разі викатних вимикачів. Шафи можуть бути обладнані відсіком допоміжних кіл 7, в якому розміщуються всі прилади і кабельна проводка.

Рисунок 7.11. Розподільні установки середньої напруги серії UniSec (ABB)

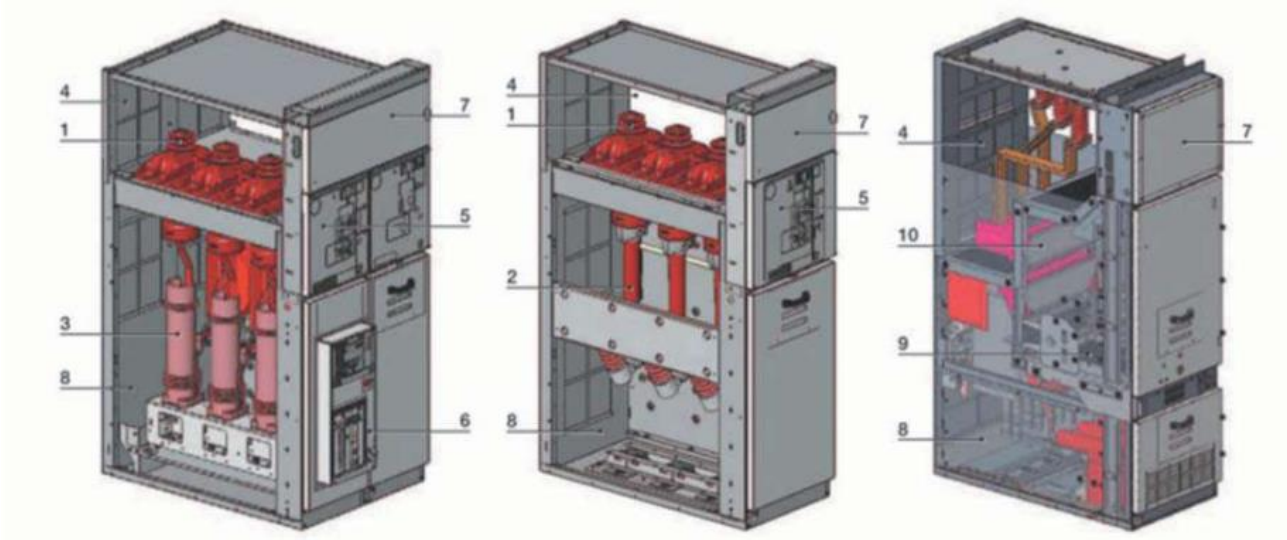


Рисунок 7.12 - Варіанти типовиконань розподільних пристроїв UniSec

Як правило, захищене від внутрішньої дуги КРУ обладнано каналом для відводу газів, що утворюються під час горіння дуги. Всі шафи мають доступ спереду, і операції обслуговування можуть виконуватися при установці КРУ до стіни. Комірки середньої напруги SafeRing (ф. ABB Ltd). Компактні розподільні пристрої (КРП) з елегазовою ізоляцією 10520 кВ SafeRing (рис. 7.13) –установки для мереж 10, 20 кВ. Має різні конфігурації, які використовуються в більшості варіантів трансформаторних підстанцій 10, 20 кВ. КРУ SafeRing та SafePlus мають однаковий зовнішній вигляд. SafeRing оснащується герметичним контейнером з нержавіючої сталі, в якому розміщуються робочі механізми та комутаційні апарати. Контейнер заповнений елегазом, який знаходиться під невеликим надлишковим тиском і забезпечує високий рівень надійності, безпеки персо-

налу та мінімальні вимоги до обслуговування. Для захисту трансформатора, можливе використання комбінації вимикача навантаження з запобіжником або силового вимикача з пристроєм релейного захисту. Шафи середньої напруги SafePlus призначені для використання на об'єктах міських компактних трансформаторних підстанції; невеликих промислових виробництв; на вітрових електростанціях.

SafePlus дозволяє використовувати широкий спектр мікропроцесорних пристроїв релейного захисту. Також, SafePlus може поставлятися з інтегрованим обладнанням телемеханіки

Рисунок 7.13. Компактний розподільний пристрій ABB SafeRing

Таблиця 7.11 - Технічні параметри комірки середньої напруги SafePlus

Параметр	Од. виміру	Значення			
Номінальна напруга	кВ	12	15	17,5	24
Випробувальна напруга промислової частоти	кВ	28	38	38	50
Випробувальна імпульсна напруга	кВ	95	95	95	125
Номінальний струм	А	630			
Вимикаюча здібність:					
Струм навантаження	А	630			
Струм заряду ненавантаженого кабелю	А	135			
Струм замикання на землю	А	200	150		
Струм заряду кабелю з замкненням на землю	А	115	87		
Вмикаюча здібність	кА	62,5	52,5	50	
Номінальний струм термічної стійкості, 1 сек.	кА	25	-	-	-
Номінальний струм термічної стійкості, 3 сек.	кА	21			
Кількість операцій		1000 ВВ (вручну)			

Розподільні пристрої RM 6, SM6 (ф. Schneider Electric).

Комірки середньої напруги Schneider Electric RM6 (рис. 7.14) – компактна розподільна установка, призначена для установки в розімкнених/замкнених кільцевих і радіальних схемах живлення середньої напруги. Виконує функції приєднання, живлення та захисту трансформаторів потужністю до 4000 кВА за допомогою силового вимикача та пристрою релейного за5 хисту. Комутаційні апарати і збірні шини розташовані в герметичному корпусі, заповненому елегазом на весь термін служби.

Рисунок 7.14 - Комірки середньої напруги RM6 (Schneider Electric)

RM6 дозволяє організувати розподільну підстанцію на 2, 3 або 4 приєднання: із захистом лінії вимикачем 630 А; з комутацією лінії вимикачем 630 А; з вбудованим живленням для пристроїв телекерування.

Корпус RM6 заповнений елегазом з надлишковим тиском 0,2 бар. Строк служби не менше 30 років. Обслуговування RM6 протягом зазначеного терміну не потрібно. Вимикач навантаження з гасінням електричної дуги на основі принципу автодуття в елегазі. Вимикачі на 200 А і 630 А – гасіння електричної дуги здійснюється методом обертання дуги і автокомпресії в елегазі, що дозволяє вимикати струми короткого замикання. Приєднання, живлення, захист ліній і трансформаторів здійснюється за допомогою вимикачів. Вимикачі оснащені незалежними реле захисту. Пристрій релейного захисту не потребує додаткового джерела живлення і живиться від первинних перетворювачів струму. Комутаційний апарат поєднує в собі одночасно функції двох пристроїв, вимикача навантаження (вимикача) і заземлюючого роз’єднувача, і має три положення: ввімкнено, вимкнено, заземлено. Рухомий контакт переміщається в вертикальній площині. Така конструкція повністю виключає можливість накладання заземлення при ввімкненому вимикачі навантаження (вимикачі).

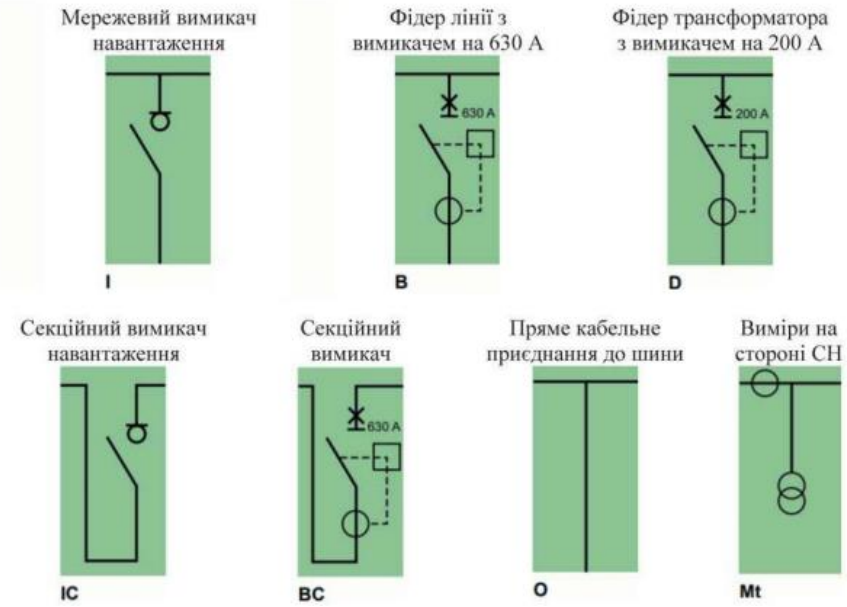


Рисунок 7.15. Схеми приєднань у комірках RM6 (Schneider Electric)

Конструкція RM6 практично виключає коротке замикання всередині розподільної установки. Разом з тим, для забезпечення повної безпеки персоналу, RM6 має стійкість до внутрішньої дуги.

РУ на базі RM6 має функції СН, які дозволяють здійснювати: приєднання, живлення та захист трансформаторів у радіальних або розімкнутих кільцевих мережах за допомогою вимикачів з номінальним струмом 200 А з незалежним ланцю-гом захисту; захист ліній за допомогою вимикачів 630 А; побудова понижуючих під-станцій на стороні СН.

Комірки середньої напруги SM6 (Schneider Electric)

SM6 (рис. 7.16) - серія модульних комірок у металевих корпусах, для внутрішнього встановлення зі стаціонарними або викатними елегазовими або вакуумними комутаційними апаратами, а саме: вимикачами навантаження; вимикачами серії SF1, SFset або Evolis; контакторами Rollarc 400 або 400D; роз'єднувачами.

Рисунок 7.16. Комірки середньої напруги SM6 (Schneider Electric)

Приєднання кабелів здійснюється спереду. Всі органи управління розташовані на передній панелі, що спрощує експлуатацію. Комірки можуть бути укомплектовані додатковими пристроями (РЗА, трансформаторами струму нульової послідовності, вимірювальними трансформатора-ми, обмежувачами перенапруги і т.д.). Роз-подільний пристрій SM6 добре адаптований для дистанційного керування.

Таблиця 7.12 - Основні характеристики SM6

Параметр	Од. виміру		Значення			
Номінальна напруга	кВ		7,2	12	17,5	24
Рівень ізоляції						
Ізоляція	50/60 Гц 1 хв		20	28	38	50
Ізоляційний пром.	50/60 Гц 1 хв		23	32	45	60
Ізоляція	1,2/50 мкс (кВ пік)		60	75	95	125
Ізоляційний пром.	1,2/50 мкс (кВ пік)		70	85	110	145
Вимикаюча здатність						
Трансформатор без навантаження	А		16			
Кабель без навантаження	А		31,5			
Номінальний струм	А		400-630-1250			
Струм термічної стійкості	кА/1 с					
		25	630-1250			
		20	630-1250			
		16	630-1250			
		12.5	400-630-1250			
Струм вмикання	кА	62.5	630			
		50	630			
		40	630			
		31.5	400-630			

Комірки розподільні середньої напруги Xiria (Eaton Corporation plc).

Нове покоління комірок Хігіа (рис. 7.17) характеризується високим рівнем експлуатаційної безпеки та придатністю для використання в мережах з напругою до 24 кВ. КРУ Хігіа можуть складатися з двох, трьох або чотирьох секцій. Основна частина первинних кіл і механізмів приводів поміщені в повністю герметичний корпус який захищає їх від впливу навколишнього середовища. У кожній з трьох або чотирьох секцій можна довільно вибирати функціональний блок з двох варіантів: вакуумний вимикач навантаження КРУ для кабельних ліній; вакуумний автоматичний вимикач для захисту трансформаторів і кабельних з'єднань. Механізм вимикачів був розроблений з мінімальним числом деталей, а також спеціально адаптований для комутації після тривалого періоду бездіяльності.

Повністю адаптовані до роботи в автоматизованих мережах. Основне ізолююче середовище чисте зневоднене повітря, дугогасне середовище вакуум.

Рисунок 7.17 - Комірки середньої напруги Xiria (Eaton Holec)

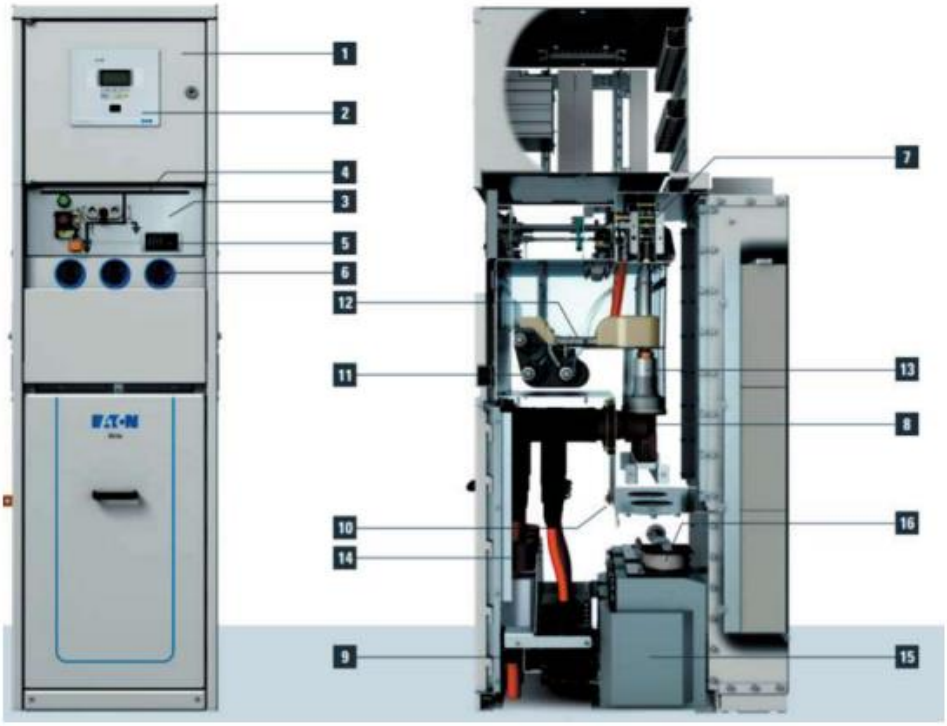
Таблиця 7.13 - Технічні характеристики Xiria E від «Eaton Holec»

Параметри	Од. виміру	Значення				
Номінальна напруга	кВ	3.6	7,2	12	17,5	24
Імпульсна напруга	кВ	40	69	75	95	125
Перенапруга промислової частоти	кВ	10	20	28	38	50
Номінальна частота	Гц	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60
Стійкість до електричної дуги	кА-с	20-1	20-1	20-1	16-1	16-1
Збірні шини						
Номінальний струм	А	630	630	630	630	630
Струм термічної стійкості при КЗ	кА-с	20-3	20-3	20-3	16-3	16-3
Струм вмикання на КЗ	кА	50	50	50	40	40
Автоматичний вимикач						
Номінальний струм	А	200/500	200/500	200/500	200/500	200/500
Вимикаюча здібність	кА	20	20	20	16	16
Струм вмикання на КЗ	кА	50	50	50	40	40
Струм термічної стійкості при КЗ	кА-с	20-3	20-3	20-3	16-3	16-3
Вимикач навантаження						
Номінальний струм	А	630	630	630	630	630
Струм вмикання на КЗ	кА	50	50	50	40	40
Струм термічної стійкості при КЗ	кА-с	20-3	20-3	20-3	16-3	16-3

Розподільні пристрої середньої напруги з комбінованою ізоляцією серії XIRIA E (рис. 7.18) для застосування в «інтелектуальних мережах». Система характеризується високим рівнем експлуатаційної безпеки і підходить для використання в мережах напругою до 24 кВ.

Розподільний пристрій Xiria E виконано з вакуумним вимикачем компанії Eaton, що не потребує обслуговування, кількість комутацій якого становить 30000 циклів. У комірці Xiria E всі первинні ланцюги і механізми знаходяться в повністю герметичному корпусі, який захищає всю

систему від впливу навколишнього середовища. Є досить компактним з шириною секції 500 мм і підключенням кабелю з фронту комірки.



1- відсік низьковольтного обладнання; 2 захисне реле;3 - панель керування з приводом автоматичного вмикання з двохпозиційного перемикача; 4 - мнемосхема; 5 система індикації напруги; 6 вікно; 7 механізм; 8 кабельні конуси; 9 - кабельні зажими: 10 заземлююча шина; 11 головні шини; 12- двохпозиційний перемикач/заземлювач; 13 вакуумна камера; 14 трансформатори струму; 15- трансформатори напруги; 16 котушка та резистор для захисту ТН від ферорезонансу

Рисунок 7.18 - Базова комплектація секції Хігіа Е з вакуумним вимикачем

Організація технічного обслуговування і ремонтних робіт.

Експлуатація розподільчих пристроїв (РУ) 0,4–10 кВ спрямована на забезпечення безпечної, безперебійної та економічної роботи електроустановок. Для підтримання їх у справному стані необхідно здійснювати планові та позапланові роботи з обслуговування й ремонту.

1. Види технічного обслуговування

1. Оглядове обслуговування — проводиться персоналом щозміни або щотижня. Передбачає:

- зовнішній огляд комірок, вимикачів, шин і контактних з’єднань;
- перевірку наявності напруги, відсутності перегрівів, сторонніх шумів, запахів, іскріння;
- контроль стану заземлення, дверей, блокувань, сигнальних ламп.

2. Планове технічне обслуговування — виконується відповідно до графіка (1–2 рази на рік):

- очищення поверхонь від пилу, вологи, окисів;

- підтягування болтових з’єднань;
- перевірка опору ізоляції мегомметром;
- випробування апаратури РЗА і комутаційних пристроїв;
- змащення механічних приводів і рухомих частин.

3. Позачергове обслуговування — здійснюється після спрацьовування захисту, коротких замикань або аварій.

2. Організація ремонтних робіт

Ремонт РУ проводиться відповідно до графіка ППР (планово-попереджувальних ремонтів) та інструкцій заводу-виробника. Основні види ремонтів:

- Поточний ремонт — усунення дрібних дефектів, заміна запобіжників, ламп сигналізації, підтягування контактів, регулювання приводів.
- Середній ремонт — перевірка стану контактів і ізоляції, заміна ущільнень, ремонт роз’єднувачів, перевірка електромагнітних приводів.
- Капітальний ремонт — повне розбирання комірок, ревізія вимикачів, ізоляції, шин, випробування обладнання під підвищеною напругою, заміна зношених елементів.

Перед початком ремонту:

- РУ виводиться з роботи, заземлюється, виставляються заборонні плакати.
- Виконується оперативне перемикання за нарядом-допуском.
- Роботи проводить бригада електротехнічного персоналу, що має відповідну групу допуску.

3. Діагностика та перевірки

Під час обслуговування і ремонту виконуються вимірювання:

- опору ізоляції мегомметром (не нижче 1 МОм для напруги до 10 кВ);
- опору контактів і шинних з’єднань мікроомметром;
- перевірка коефіцієнта трансформації трансформаторів струму та напруги;
- контроль параметрів комутаційних апаратів (струм спрацювання, час відключення);
- перевірка роботи блокувань і систем заземлення.

Для виявлення дефектів застосовують тепловізійний контроль, вимірювання часткових розрядів, віброконтроль та візуальну діагностику.

Висновки.

1. 1. Розподільчі пристрої є ключовим елементом систем електропостачання, від їх технічного стану залежить надійність і безпека всієї енергосистеми.
2. 2. Основними типами РУ 0,4–10 кВ є комплектні установки (КРУ, КЗО, КУ-10Ц, КУ-35) і сучасні модульні системи (NXAIR, UniSec, SM6, RM6, Xiria).

3. 3. Для забезпечення безпечної експлуатації необхідно дотримуватись вимог стандартів, інструкцій з обслуговування та періодичності технічних робіт.

4. 4. Регулярне технічне обслуговування, діагностика та своєчасні ремонти запобігають аваріям, продовжують строк служби обладнання і знижують експлуатаційні витрати.

5. 5. У сучасних КРУ застосовуються вакуумні та елегазові вимикачі, що потребують мінімального обслуговування, але вимагають періодичного контролю щільності ізоляції та функціонування приводів.

Контрольні питання.

1. Що називають розподільчим пристроєм і які основні елементи він містить?
2. Які типи РУ за місцем розташування існують?
3. У чому полягають переваги комплектних розподільчих пристроїв порівняно зі збірними?
4. Назвіть основні конструктивні особливості комірок КУ-10Ц і КЗО-10.
5. Які види технічного обслуговування розподільчих пристроїв проводяться на підприємствах?
6. Які основні операції виконує персонал під час планового технічного обслуговування?
7. Які вимоги безпеки необхідно виконати перед початком ремонтних робіт у РУ?
8. Які параметри перевіряють під час діагностики РУ 6–10 кВ?
9. Які сучасні методи неруйнівного контролю використовують для оцінки стану контактів і ізоляції?
10. Як ведеться облік результатів технічного обслуговування і ремонтів?
11. У чому полягає різниця між поточним, середнім і капітальним ремонтом?
12. Які елементи розподільчого пристрою потребують особливої уваги при профілактиці?
13. Які переваги мають вакуумні та елегазові комутаційні апарати у складі сучасних РУ?
14. Які заходи сприяють продовженню строку служби розподільчих пристроїв?
15. Як визначається необхідність проведення позачергового ремонту?

Використана література.

1. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / А. Ю. Орлович та ін. Кропивницький : Видавець Лисенко В.Ф., 2019. 272 с.

ТЕМА 8. ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ: ЕКСПЛУАТАЦІЯ, ТИПОВІ НЕСПРАВНОСТІ, ДІАГНОСТИКА ТА ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

Функції та класифікація електронних приладів. Датчики, регулятори, перетворювачі. Типові несправності, методи діагностики та відновлення працездатності.

Вимірювальні перетворювачі на електричних величин

На виробництві вимірюють значну кількість неелектричних фізичних величин. Кількість їх значно перевищує вимірювані електричні величини, а кількість місць на кожному енергоблоці, де роблять такі вимірювання, перевищує сотні.

Серед механічних величин, що підлягають вимірюванням величини: мас, зусиль обертових моментів,• рівнів заповнення ємностей з водою, хімічними реактивами, мазутом, вугільним пилом, амплітуд і частот вібрацій, частот обертання, витрат води, пари тощо.

Особливу увагу приділяють вимірюванням теплових величин: температур обмоток електричних машин і трансформаторів, води, пари, повітря тощо.

Контролюють величини, що визначають властивості і склад речовин: хімічний склад газових сумішей, концентрацію розчинів, солоність води, вологість повітря, мазуту, вугілля та ін.

Для вимірювання вказаних величин використовують вимірювальні перетворювачі (датчики), що перетворюють вимірювані фізичні величини на електричні.

Вимірювальні перетворювачі механічних величин зі змінними активними опорами.

До цієї групи відносять реостатні перетворювачі переміщень і тензорезистивні перетворювачі.

Реостатні перетворювачі (датчики) переміщень виконують на основі намотаних дротом високого питомого опору резисторів з повзунком, що пересувається під дією об’єкта, розмір переміщення котрого необхідно вимірювати.

Для контролю величини поступальних переміщень, або обмежених кутових переміщень застосовують прямолінійні реостати, а для контролю величини значних кутових переміщень — дугові чи кутові. Дві можливі конструкції реостатів показано на рис. 8.1, а, б.

У цих перетворювачах величина опору чи напруги між нерухомим і рухомим контактами є залежною від величини переміщення рухомого контакту відносно нерухомого.

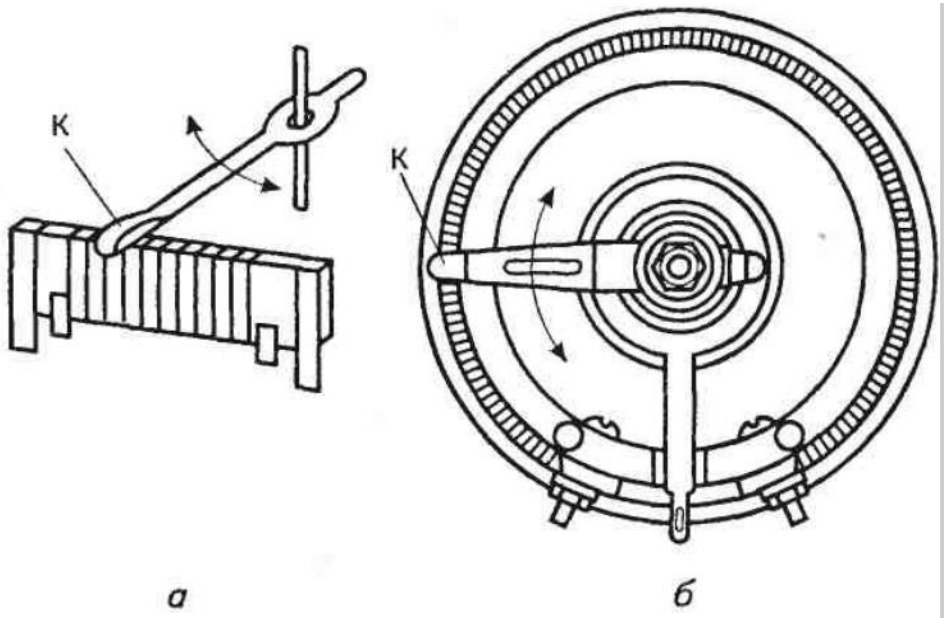


Рисунок 8.1 - Реостатні перетворювачі: а – прямолінійний;
б – коловий

Для визначення величини сили, шо діє на будь-яку конструкцію, найпростішим перетворювачем може бути дріт, що розтягується разом з конструкцією, до якої його прикріплено, та змінює величину свого електричного опору. Такий перетворювач зображено на рис. 8.2. Він складається з паперової чи плівкової полімерної підкладки 1, на яку наклеєно дріт 3 матеріалу, чутливого до розтягування й здатного змінювати при цьому свій опір. До кінців цього дроту зварюванням чи паянням прикріплено мідні проводи, що з’єднують перетворювач з вимірювальною схемою. Поверх перетворювача наклеєно захисний шар паперу. Такі перетворювачі називають тензометрами.

Дротяні тензометри наклеюють на чисту поверхню випробуваної конструкції 2 за допомогою клею. Мідні проводи, що виходять з тензометра, приєднують до мостової або потенціометричної схеми, що вимірює опір. Про величину сили, що діє на випробувану конструкцію, роблять висновок за величиною зміни опору при розтягуванні тензометра разом з конструкцією.

Тензометри виготовляють з тонкого (діаметр 0,02... ...0,05 мм) константанового, копелевого, ніхромового чи нікелевого дроту, укладеного у 2...40 рядів. Довжина цих рядів під 5 до 25 мм, хоча інколи може досягти й 100 мм. Ширина тензометра 1... 10 мм.

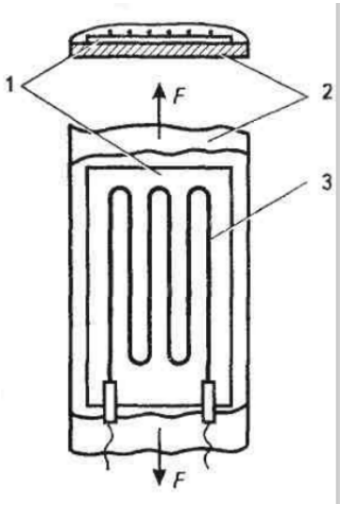


Рисунок 8.2 - Тензорезистивний перетворювач

Індуктивні вимірювальні перетворювачі

В індуктивному перетворювачі при взаємному переміщенні його частин змінюється опір магнітного кола, а разом з ним і величина індуктивності обмотки цього перетворювача. Чим більшим буде магнітний опір, тим меншою стане величина індуктивності обмотки, а відтак, і її реактивний опір.

Два різновиди індуктивних перетворювачів показано на рис. 8.3. Перетворювач, що є на рис. 8.3, а, можна застосовувати для вимірювання відносно малих переміщень — віт сотих часток міліметра до 5... 10 мм. Перетворювач, зображений на рис. 8.3, б, здатний вимірювати величини переміщення його рухомої частини 2 до 100...120 мм: Якщо відстань l у обох перетворювачів зменшується, то зменшується величина магнітного опору їхніх магнітних систем і збільшується величина індуктивності обмоток 3 цих перетворювачів. Якщо обмотки 3 через прилад, що вимірює струм, приєднати до джерела змінного струму з відомою і незмінною величиною напруги, то за величиною струму, яку показує прилад, можна мати уявлення про величину l, що є між рухомими частинами перетворювачів і кінцевим їхнім положенням. На рис. 8.3, в показано (орієнтовно) залежність між величиною струму котушок перетворювачів від відстаней l. При значних величинах l, де величина індуктивності котушок найменша, бо визначається лише величинами магнітних опорів розсіювання магнітних потоків у повітрі, переміщення рухомих частин перетворювачів (якорів) майже не впливає на величини струмів котушок. Звичайно, для перетворювачів такі відстані слід визнати неробочими.

Подібні перетворювачі працюють на частотах 50 Гц (найчастіше), і при підвищених частотах — 400...1000 Гц. При підвищених частотах індуктивні перетворювачі бувають меншими за розмірами ніж ті, що працюють на частоті 50 Гц.

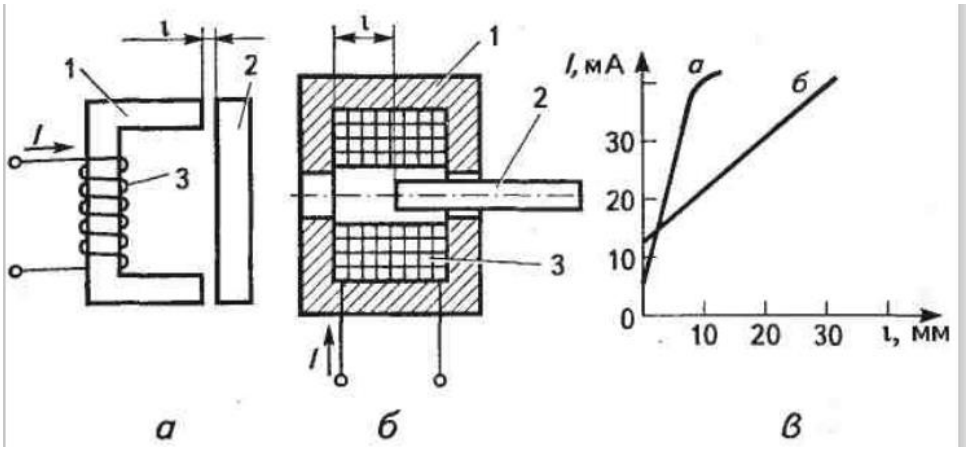


Рисунок 8.3 – Індуктивний перетворювач

Індукційні перетворювачі працюють завдяки наявності магнітної індукції. Індукційні перетворювачі, що створюють електричні сигнали, пропорційні швидкостям поступального і обертового руху, показано на рис. 8.4. У обмотках 1 цих перетворювачів, при їх рухові у магнітному полі, створюваному постійними магнітами 2, виникають ЕРС, пропорційні швидкостям руху цих обмоток (точніше — пропорційні швидкостям, з якими витки цих обмоток перегинають силові лінії" магнітних полів).

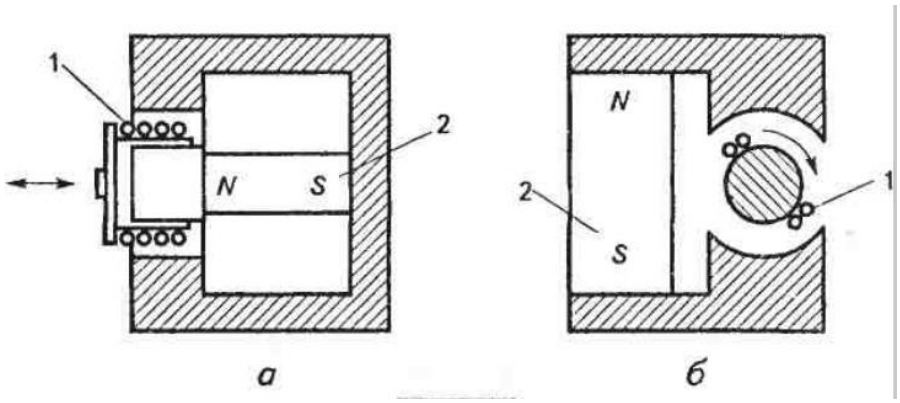


Рисунок 8.4 - Індукційний перетворювач для вимірювання вібрації (а) швидкості (б)

Перетворювач, зображений на рис. 8.4, а, придатний лише для контролю швидкості зворотно-поступального руху, наприклад, для вимірювань швидкостей вібрації. Щодо перетворювача, зображеного на рис. 8.4, б, то він придатний для вироблення сигналу й при безперервному обертанні обмотки 1 у магнітному полі. Тільки у цьому разі ЕРС, що виникає в обмотці, на кожному її оберті двічі змінюватиме знак, тобто обмотка вироблятиме ЕРС змінного струму. На основі такого перетворювача виконують перетворювачі швидкості обертання у пропорційну їй ЕРС змінного струму, якщо ЕРС з кінців обмотки знімати щітками з контактних кілець; чи постійного струму, якщо зняття ЕРС з обмотки виконують за

допомогою колектору. Подібні перетворювачі (рис. 8.4, б) називають тахогенераторами. їх широко застосовують для вимірювання швидкості обертання в усіх галузях техніки.

Взаємоіндуктивні вимірювальні перетворювачі

Взаємоіндуктивні перетворювачі — це трансформаторні перетворювачі. Вони завжди мають хоча б дві обмотки (рис. 8.5, а, б): первинну 1 (намагнічувальну, приєднану до джерела живлення змінного струму з постійною за величиною напругою) і вторинну — вимірювальну 2, яку належить приєднати до електровимірювального приладу, що вимірює напругу (до вольтметра чи до схеми, що вимірює величину напруги змінного струму).

Перетворювач для вимірювання переміщень значної величини (порядку 1 м) зображено на рис. 8.5, а. Під кожним вимірювальної обмотки перетворювача від вимірюваної величини (тобто відстані чи кута повороту). Напруги позначено у їхніх ефективних значеннях.

ЕРС E_2, яку дає вимірювальна обмотка 2 і яка залежить від величини змінного магнітного потоку, що є у нерухомому му осерді 3 у місці знаходження цієї обмотки, буде тим меншою, чим далі ця обмотка розташована від обмотки збудження 1, бо щільність силових ліній магнітного поля (магнітна індукція) буде більшою саме поблизу обмотки 1, як видно з рис. 8.5, а. Зауважимо, що ЕРС E_2змінює фазу на 180° (рис. 8.5, б), тому вимірювання ЕРС дійсно дає результат, показаний на графіку, де тільки з виміряної величини E_2неможливо відрізнити, скажімо, кут повороту на 90° від кута повороту на 270°.

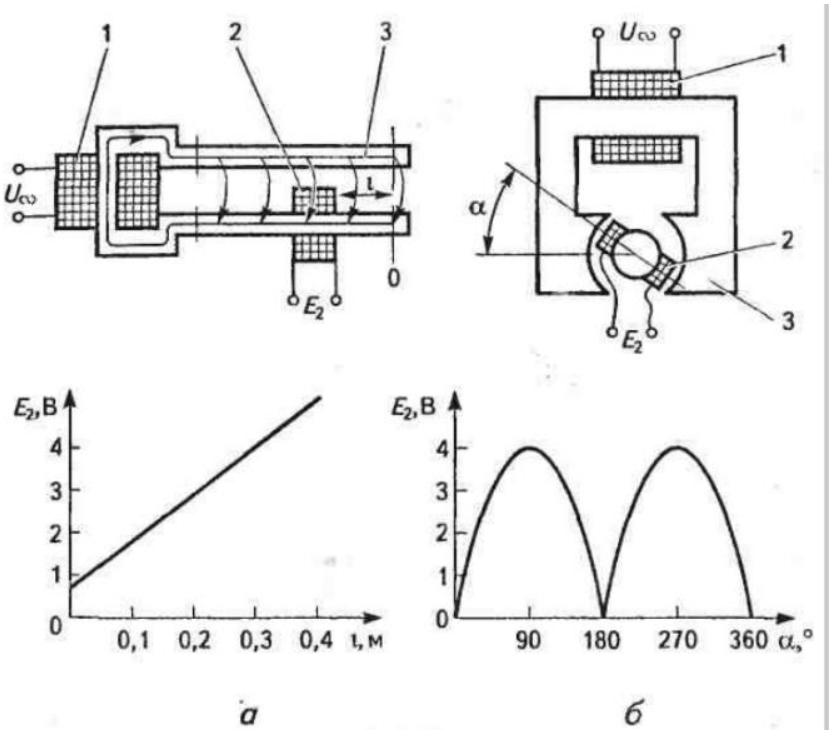


Рисунок 8.5 - Взаємоіндуктивні перетворювачі

Розрізнити ці кути повороту можна, використовуючи фазочутливі схеми, за допомогою котрих можна, користуючись вольтметром постійного струму з нулем посередині шкали, одержати при α = 0°...180° позитивні показання вольтметра, а при кутах α = 180°...360° — негативні.

На відміну від попередньо розглянутих індукційних перетворювачів, де ЕРС E_2настає лише від руху обмоток, у взаємоіндуктивних перетворювачів ЕРС вимірювальних обмоток існує і при їх нерухомому стані.

Тобто за допомогою таких перетворювачів можна чітко визначити положення як рухомих, так і нерухомих частин і вузлів виробничих механізмів.

Ємнісні вимірювальні перетворювачі

Ємнісні перетворювачі — це конденсатори, величина ємності котрих залежить від вимірюваної неелектричної величини. Ємнісні перетворювачі використовують для вимірювань невеликих переміщень, визначення складу рідких сумішей, рівня заповнення виробничих ємностей рідкими чи сипучими речовинами.

Ряд ємнісних перетворювачів показано на рис. 8.6. Плоский конденсатор може бути використаний для вимірювань невеликих переміщень (рис. 8.6, а), коли змінюється відстань l між його пластинами. Величина ємності C такого конденсатора, якщо він знаходиться у повітрі,

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{l},$$

де ε_0 – діелектрична постійна ($\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);
S - площа кожної пластини, м2;
l - відстань між пластинами, м.

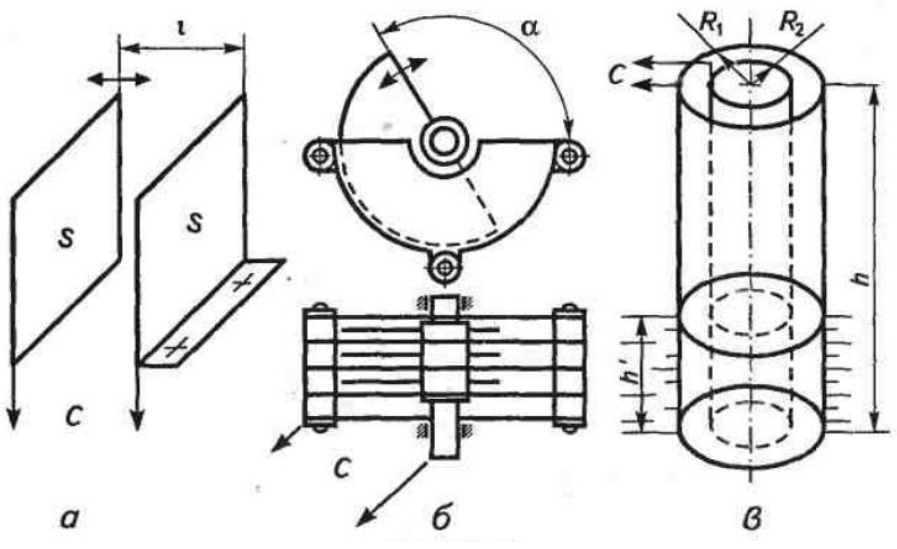


Рисунок 8.6 – Ємнісні перетворювачі

При величині площі кожної пластини 10см^2 (10^{-3}м^2) і відстані між пластинами 1 мм (10^{-3}м) величина ємності конденсатора буде всього $8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф, тобто $8{,}85$ пФ. А якщо відстань між пластина¬ми збільшити до 10 мм, то ємність стане меншою за 1 пФ. Такі малі ємності сумірні з ємністю проводів та з ємністю між пластинами і близько розташованими частинами механізму, величини переміщень якого вимірюють. Все це знижуватиме точність вимірювань ємності такого конденсатора, а значить і точність визначення відстані l. Тому перетворювачі величин відстаней чи переміщень на основі плоских конденсаторів майже не використовують.

В той самий час багатопластинчастий конденсатор (рис. 8.6, б), за допомогою якого можна визначити величину куга повороту, що змінює ємність за рахунок зміни площі взаємодії пластин конденсатора (такі конденсатори до недавнього часу використовували майже в усіх радіоприймачах, їхня найбільша ємність десь близько 500 пФ), можна беззаперечно використати як перетворювач кута повороту в електричну ємність.

У циліндричного конденсатора (рис. 8.6, в) величина ємності визначається виразом

$$\text{C} = \frac{2\pi h'\varepsilon}{ln\frac{R_1}{R_2}} + \frac{2\pi(h-h')\varepsilon_0}{ln\frac{R_1}{R_2}},$$

де h — довжина конденсатора, м;

h' — висота рівня речовини, що знаходиться між циліндричними електродами, м;

ε — абсолютна діелектрична проникність речовини, що знаходиться у проміжку між циліндричними елек-тродами, Ф/м;

R_1, — внутрішній радіус зовнішнього електрода*, м;*

R_2— зовнішній радіус внутрішнього електрода, м.

Він може мати достатню ємність при значній його довжині та за суттєво більшої, ніж у повітря, діелектричної проникності є. Найчастіше такий перетворювач використовують у ємнісних рівнемірах, які вимірюють рівні рідких не- електропровідних речовин (наприклад, бензину у високих ємностях).

Якщо речовина, що залита у технологічну ємність, не діелектрик, а провідник, як, наприклад, розчини кислот і солей, то вимірювальний конденсатор перетворювача висоти рівня у величину електричної ємності можна виконувати у вигляді одного електрода, ізольованого шаром матеріалу зі значною діелектричною проникністю, наприклад деякими полімерними матеріалами. У цьому разі другим (заземленим) електродом конденсатора буде сама електропровідна речовина, шо облягає ізоляцію стрижня, який є першим електродом такого конденсатора.

Теплові вимірювальні перетворювачі

Теплові вимірювальні перетворювачі, що серед вимірювальних перетворювачів чи не найчастіше застосовуються на теплових електростанціях 'та теплоелектроцентралях, поширені й на підприємствах усіх галузей промисловості, де у технологічному процесі використовують тепло.

У багатьох точках технологічного процесу вимірюють температури за допомогою термоелектричних чи терморезистивних перетворювачів. Термоелектричні перетворювачі — це в основному термопари, а терморезистивні — це термометри опору.

Термопари є генеруючими перетворювачами. Кожна з них складається з двох різнорідних проводів, з'єднаних у одному з кінців зварюванням чи лютуванням.

У термопар термоелектрорушійна сила виникає за наявності різниці температур місць з'єднання цих різнорідних провідників, перше з яких розташоване у місці вимірювання температури (де знаходиться саме місце зварювання), а друге — у місці приєднання цих провідників до електровимірювальних приладів, що вимірюють термо-ЕРС.

Для вимірювань різних величин температур використовують і різні термопари. Так, для температур нагріву не вищих за 600 °С користуються мідноконстантановими термопарами, для температур до 1600 °С — платинородій-платиновими, до 2500 °С — вольфраморенієвими. Тут вказані найбільш допустимі для вказаних термопар температури короткочасного наїріву. Якщо ж термопару використовують протягом тривалого часу, то допустима температура повинна бути дещо меншою (на декілька сотень градусів).

Відносно величини створюваних термопарами термо- ЕРС, то з названих термопар найбільшу має хромель-копелева термопара (66,4 мВ при 800 °С), а найменшу — платинородій-платинова (16,76 мВ при 1600 °С).

Наведені величини термо-ЕРС передбачають, що кінці термопар, приєднані до вимірювальних приладів, перебувають при температурі 0 °С. У реальних умовах експлуатації приладів, коли температура навколо них буде близько 20 °С, справжні значення термо-ЕРС будуть дещо меншими.

Для кожного типу термопари передбачена своя залежність величини термо-ЕРС від величини температури між кінцями термопари. Ці залежності наведено у Державному стандарті на термопари, де вони дещо відрізняються від прямих.

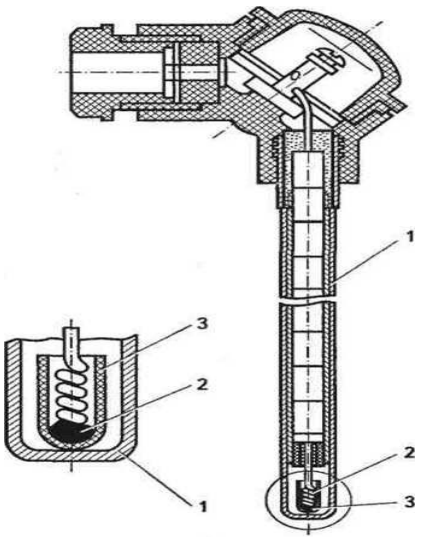


Рисунок 8.7 - Термопара з арматурою

Тому мілівольтметри, якими вимірюють ЕРС термопар, градуюють у одиницях температури, беручи до уваги наявність такого відхилення для термопар кожного типу. Якщо ж ці ЕРС вимірюють переносними мілівольтметрами, градуйованими у мілівольтах, то для точного вимірювання температури термопарою необхідно користуватись таблицями, де наведено залежність ЕРС кожного типу термопар від температури.

Кожну термопару вміщено в арматуру, що захищає її від зовнішніх чинників та фіксує постійне місце її встановлення. У більшості випадків (рис. 8.7) арматуру 1 виготовлено з металу, до температури 400 °С — з міді чи латуні, до 700…800 °С — зі сталі, а для температур, більших ніж 1000... 1200 °С, — з порцеляни чи кварцу. Місце зварювання проводів термопари 2 ізолюється від денця металевої захисної трубки керамічним наконечником 3. Проводи термопари, що виходять з арматури, приєднані до контактів, закріплених у з’єднувальній коробці арматури. Всередині арматури проводи термопари ізольовано один від одного керамічними трубками чи бусами, а простір між ізольованими проводами і стінкою арматури засипано керамічним порошком.

Через штуцер, вставлений під прямим кутом до арматури, проходять проводи від вимірювальних приладів, що приєднуються до проводів термопари через затискачі, встановлені у з’єднувальній коробці арматури.

Якщо термопара працює при особливо високих температурах, арматура може охолоджуватись на більшій частині своєї довжини пристроєм вода ного охолодження, виконаним у вигляді металевої трубки з двошаровою стінкою, у щілині, між шарами якої циркулює охолоджувальна вода, що надходить до цього проміжку та виходить з нього через штуцери, встановлені у верхній частині охолоджувального пристрою.

Терморезистивні перетворювачі (термометри електричного опору) — це вимірювальні перетворювачі, де використовується здатність про-

відників (іноді — напівпровідників) змінювати свій питомий опір під впливом температури, що є навколо них.

Найпоширенішими є перетворювачі, виготовлені з мідного чи платинового проводу. Мідні перетворювачі виконують для роботи при температурах від —50 до 180 °С, платинові ж розраховано на більший діапазон вимірюваних температур, а саме: від —200 до 1100 °С.

Терморезистивні перетворювачі можуть бути зроблені й зі стального або нікелевого проводу, але таке буває рідко.

Терморезистори виконані з мідного ізольованого проводу, закладені у мідну трубку, заповнену керамічним піском.

Платинові терморезистори виконані у вигляді тонких спіралей, закладених у поздовжні канавки керамічного каркаса. Як і у мідних перетворювачах, порожні місця тут засипано порошком оксиду алюмінію, бо очікувані температури тут більші, ніж у мідних, і оксид алюмінію буде більш доцільним.

Ці терморезистори закладають у металеві (з нержавіючої сталі) трубки, які захищають їх від механічних пошкоджень.

Загальний вигляд складеного терморезистора зображено на рис. 8.8.

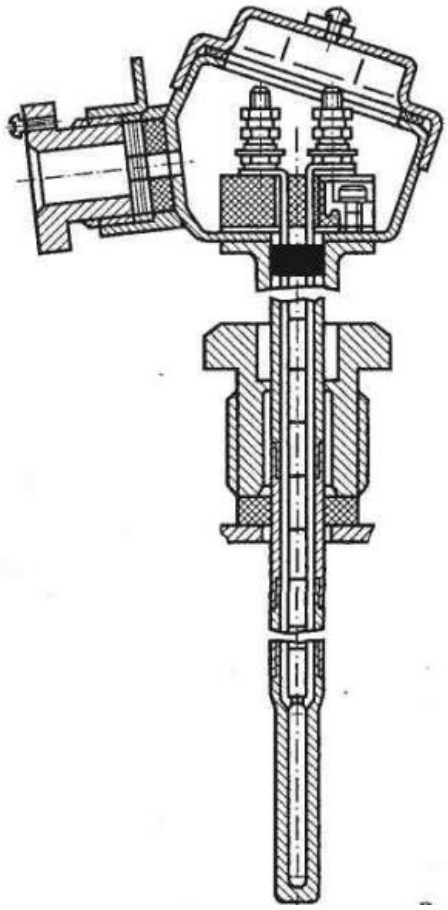


Рисунок 8.8 - Загальний вигляд терморезистора

Деякі терморезистори можуть бути виконані на основі напівпровідникових матеріалів, що мають величину температурного коефіцієнта питомого опору у декілька разів більшу, ніж у металів. На них можна було б створити досить точну систему вимірювань температури, але стає цьому на заваді значна нелінійність їхніх характеристик, незбіг характеристик однотипних елементів, різниця температурних коефіцієнтів питомого опору в сусідніх зразках, значна різниця величин номінальних опорів сусідніх зразків.

І все ж за невисоких температур (до 200...300 °С) напівпровідникові терморезистори застосовуються у системах вимірювань температури, а дещо частіше — і в системах автоматичного регулювання температури.

Електрохімічні вимірювальні перетворювачі.

Електрохімічні перетворювачі контролюють склад, стан та інші фізико-хімічні властивості речовин чи сумішей або розчинів речовин завдяки створенню певних величин опорів, струму, падіння напруги чи ЕРС, які відповідають певним значенням контрольованих величин.

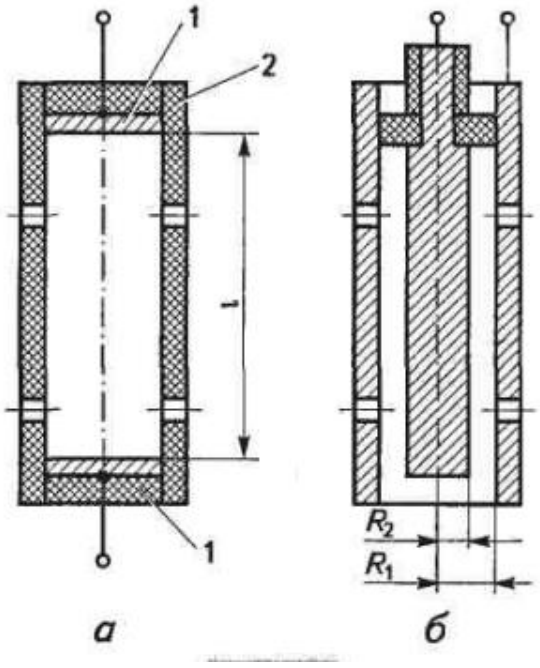


Рисунок 8.9 – Резистивний електролітичний перетворювач
а- з плоскими електродами; б – з циліндричними електродами

Такі перетворювачі виконують у вигляді комірки обмеженого розміру, заповненої речовиною, сумішшю або розчином, та електродів, що приєднані до схеми вимірювання електричної величини, функціонально пов’язаної з контрольованою величиною (наприклад, з величиною концентрації).

Резистивні електролітичні перетворювачі широко використовують для вимірювань концентрації розчинів. Ці перетворювачі можуть складатися (рис. 8.9, а) з двох плоских електродів 1, розташованих у торцях

відрізку труби 2, виготовленої з ізоляційного матеріалу. Крізь трубу проходить контрольований розчин. Якщо електроди через амперметр буде підключено до джерела струму (до вторинної обмотки трансформатора), то за величинами напруги і струму можна розрахувати величину опору розчину, що є між електродами. Якщо внутрішні розміри резистивного електролітичного перетворювача (внутрішня довжина труби та площа електродів) відомі, нескладно розрахувати й питомий опір розчину, що протікає упоперек трубки. А вже з величини питомого опору розчину судять про його концентрацію.

Резистивні електролітичні перетворювачі живляться виключно змінним струмом. Якби такі перетворювачі живилися від джерела постійного струму, то через наявність електролізу розчину на його електродах з'явились би пухирці газів (на одному — водню, а на іншому — кисню), що з часом спотворило б результати вимірювань опору.

У правильності вимірювань концентрації можна бути впевненими лише у тому разі, коли вимірювання проводяться при певній температурі розчину, для якої відома залежність величини опору від величини концентрації.

Крім того, у правильності вимірювань можна бути впевненими також тоді, коли заздалегідь відомо, що концентрація розчину знаходиться у певних межах (наприклад, що у місці вимірювань можуть бути лише незначні величини концентрації, чи, навпаки, великі).

Резистивний перетворювач для визначення концентрації розчинів може бути виконаний з циліндричними коаксіальними електродами, як зображено на рис. 8.9, б. Такий перетворювач доцільно застосовувати для вимірювань концентрації розчинів переважно з великим питомим електричним опором, бо тут довжина ділянки протікання струму через розчин — замала (це різниця між внутрішнім радіусом R_1 зовнішнього електрода і зовнішнім радіусом вігутрішнього електрода R_2), а площі, між якими протікає струм,— великі. Це дає можливість навіть за наявності великого питомого опору розчину одержати прийнятну для вимірювань величину опору перетворювача.

При виготовленні перетворювачів, подібних до тих, що вже розглянуті, звичайно, необхідно застосувати матеріал, що не руйнується у контрольованому розчині.

Подібні перетворювачі застосовують як стаціонарні, для постійного контролю величини питомого опору розчинів, так і переносні — для періодичного контролю. У перетворювачів періодичного контролю кількість отворів повинна бути дещо більшою, ніж показано на рис. 8.9. Крім того, розташування отворів повинно бути таким, щоб уникнути затримки повітря у зоні заповнення перетворювача рідиною.

Фотоелектричні перетворювачі.

Фотоелектричні перетворювачі (частіше їх називають фотоелементами), поділяються на три групи: фотоелементи з зовнішнім фотоефектом; фотоелементи з внутрішнім фотоефектом; вентильні фотоелемен-

ти (рис. 8.10). Кожний фотоелемент має свої характеристики, відмінні від характеристик інших фотоелементів, навіть якщо вони належать до однієї групи. Головними характеристиками фотоелементів є:

- світлова характеристика, що показує залежність струму фотоелемента від інтенсивності світлового потоку, який на нього падає;
- спектральна характеристика — залежність величини струму фотоелемента від довжини хвилі променів, що діють на фотоелемент при незмінній напрузі живлення фотоелемента та інтенсивності світлового потоку;
- вольт-амперна характеристика, тобто залежність величини струму фотоелемента від величини прикладеної до нього напруги при незмінній інтенсивності світлового потоку, що падає на фотоелемент;
- частотна характеристика — залежність струму фотоелемента від частоти зміни інтенсивності світлового потоку;
- характеристика зниження чутливості фотоелемента від часу його безперервної роботи.

Для фотоелементів важливими є інтегральна чутливість, що може бути визначена з їхніх світлових характеристик, і спектральна чутливість, що визначається для кожної певної частоти з спектральної характеристики фотоелемента.

Фотоелементи з зовнішнім фотоефектом виконано у вигляді електронної лампи, що має лише анод і катод. При цьому катод виконано світлочутливим у вигляді киснево-цезієвого чи киснево-стибієвого шару, нанесе-ного на скло. За наявності напруги між анодом і катодом і наявності освітлення світлочутливого шару між катодом і анодом проходить електричний струм, величина якого буде тим більшою, чим більший світловий потік падатиме на катод.

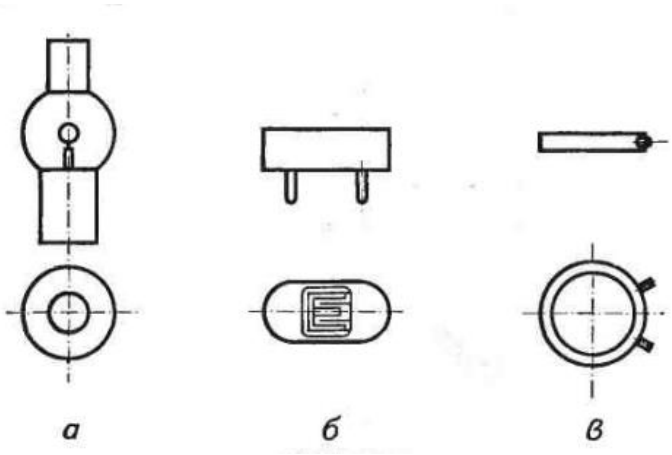


Рисунок 8.10 - Фотоелементи: а – з зовнішнім фотоефектом;
б – з внутрішнім фотоефектом; в - вентильний

Залежно від середовища всередині балона фотоелемента вони можуть бути вакуумні чи газонаповнені. Газонаповнені фотоелементи ві-

дрізняються від вакуумних тим, що в їхніх балонах інертний газ перебуває під тиском, що не перевищує 1 мм рт. ст.

Характеристики фотоелементів наведено на рис. 8.11. Світлові характеристики двох киснево- цезієвих елементів показані на рис. 8.11, а. Характеристика 1 стосується газонаповненого фотоелемента, а характеристика 2 — вакуумного. Для об'єктивного порівняння напруги, прикладені до обох фотоелементів, були однаковими і дорівнювали 240 В. Графіки свідчать про перевагу газонаповненого фотоелемента над вакуумним, бо перший (газонаповнений) при рівних світлових потоках, що падають на обидва фотоелементи, має набагато більший струм, ніж другий (вакуумний). Але з характеристик також видно, що у газонаповненого фотоелемента величина струму зростає швидше, ніж світловий потік. При підвищенні напруги це може спричинити виникнення самостійного газового роз-ряду з руйнуванням катодного покриття та повним виходом з ладу фотоелемента.

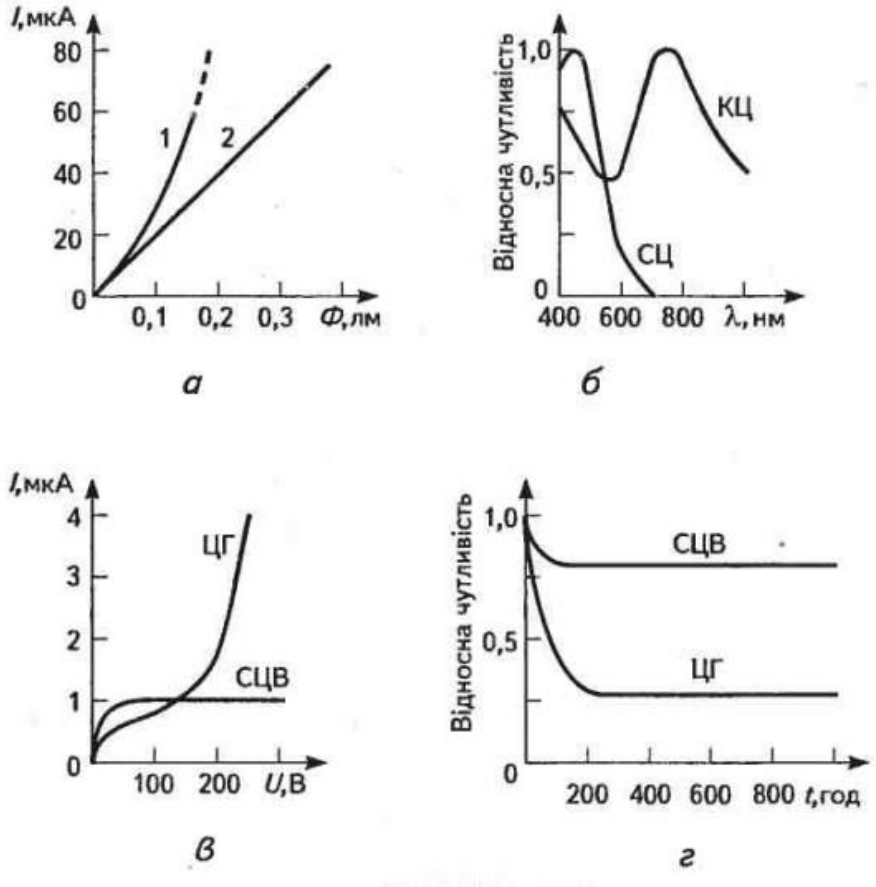


Рисунок 8.11 - Характеристики фотоелементів із зовнішнім фотоефектом: а — світлова; б — спектральна; в — вольт-амперна; г — старіння

Спектральні характеристики фотоелементів зображено на рис. 8.11, б. З характеристик видно, шо стибій-цезієвий фотоелемент СЦ доцільно використовувати головним чином у високочастотній частині спек-

тра видимого світла, а киснево-цезієвий КЦ — практично в усій видимій частині спектра.

Вольт-амперні характеристики фотоелементів зображено на рис. 8.11, в. Розглядаючи їх, можна дійти висновку, що при малих напругах більш сприйнятливою буде характеристика вакуумного фотоелемента, бо від нього можна одержати більшу величину струму при рівних напрузі й світловому потоці з газонаповненим фотоелементом. Хоча при більших величинах напруг доцільніше використовувати цезієвий газонаповнений фотоелемент.

Дві характеристики старіння фотоелементів наведено на рис. 8.11, г. Порівняння цих характеристик дає можливість зробити висновок про те, що вакуумні фотоелементи у процесі роботи при незмінних напрузі і світловому потоці можуть зменшувати чутливість (всього на 20 % порівняно з початковою) у меншій мірі, ніж цезієвий газонаповнений фотоелемент. За перші ж 200 годин роботи цей фотоелемент зменшує чутливість майже у чотири рази і далі працює з таким самим зменшенням.

Фотоелементи із зовнішнім фотоефектом завжди потребують підсилення електричних сигналів, бо їхній вихідний струм здебільшого становить лише кілька мікроампер. Тому вони звичайно працюють з електронним чи напівпровідниковим підсилювачем.

Фотоелементи з внутрішнім фотоефектом (фоторезистори) зменшують опір під дією променевої енергії. Виконують їх на основі напівпровідників, а саме: селену, сірчанокислих талію, вісмуту, свинцю тощо. Кращими напівпровідниками для таких фотоелементів можуть бути германій і силіцій.

Фоторезистори байдужі до зміни полярності напруги, прикладеної до них, і мають характеристики, зовнішньо де-що подібні до розглянутих вище, але здатних пропускати через себе значно більші струми (до кількох десятків міліампер). Для фоторезисторів важливою величиною є кратність зміни величини їхнього опору при переході від повної темноти до повного їх освітлення. Ця кратність може бути від 30...35 до 140...150.

Строк їхньої роботи (без порушення правил експлуатації) необмежений. Але вони досить чутливі до дії вологи і мають значну інерційність (тобто змінюють величину опору через деякий час після зміни інтенсивності освітлення). В усякому разі постійна часу фотоструму у них може досягти кількох сотих секунди.

Вентильні фотоелементи — це фотоелементи з запираючим шаром. Будова такого фотоелемента і схема вмикання його в електричне коло показані на рис. 18.12, а.

Світлова характеристика міднозакисного фотоелемента при різних величинах опорів навантаження показана на рис. 8.12, б. Фотоелемент складається з чотирьох шарів: 1 — напівпрозорий електрод; 2 — замикаючий шар; 3 — шар закису міді; 4 — мідна основа.

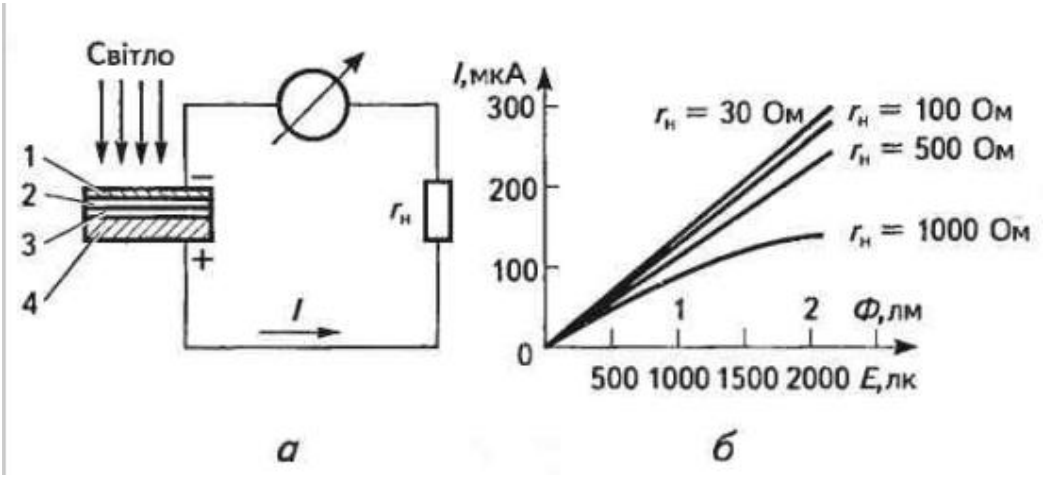


Рисунок 8.12 - Вентильний фотоелемент:
а — будова фотоелемента; б — світлова характеристика

Замикаючий шар надзвичайно тонкий і тому електрони, розташовані у напівпровіднику 3 поблизу цього шару, одержавши від поглинутих напівпровідником фотонів зі світлового потоку додаткову енергію, перетинають замикаючий шар 2 і створюють негативний заряд на напівпрозорому електроді 1. Мідна основа при цьому одержує позитивний заряд. Через наявність замкненого шляху через вимірювальний прилад і резистор навантаження $r_н$ між мідною основою 4 і напівпрозорим шаром 1 потече струм. Величина цього струму буде тим більша, чим більшою буде величина світлового потоку і чим меншою — величина опору $r_н$, як показано на рис. 8.12,б. Форма спектральних характеристик таких фотоелементів схожа на ту, що була наведена раніше, але величина струмів, які генерує фотоелемент, буде значно більшою і може навіть перевищувати 1 мА. Тобто такий фотоелемент буде здатним безпосередньо живити обмотку будь-якого чутливого реле (наприклад, поляризованого) і, при достатній величині світлового потоку, може викликати його спрацювання.

Світлові перетворювачі часто застосовуються в приладах, що вимірюють неелектричні величини електричним методом. Так, на їхній основі виконують пірометри — для безконтактного вимірювання високих температур нагріву; калориметри — для вимірювань кількості тепла; експозиметри — для вимірювання освітленості об’єктів фото- і кінозйомки; нефелометри — для вимірювань ступеня каламутності рідин чи газів; прилади для вимірювань якості поверхні, вологості по точці роси, дія підрахунку виробів, що пересуваються на конвеєрі, тощо.

Автоматизація вимірювального процесу

Ефективність використання технічних систем у більшості практичних випадків оцінюється на етапі їх експлуатації, але інформативність і ресурси інформаційно вимірювальних систем ІВС визначаються і реалі-

зовуються під час їх створення. На цьому етапі основні положення і методи теорії ІВС використовуються у повному обсязі.

Етапи життєвого циклу ІВС. З метою більш глибокого розуміння важливості основних положень теорії ІВС для створення систем

вимірювань розглянемо ілюстративну схему послідовності етапів життєвого циклу ІВС представлену на рис. 8.13.

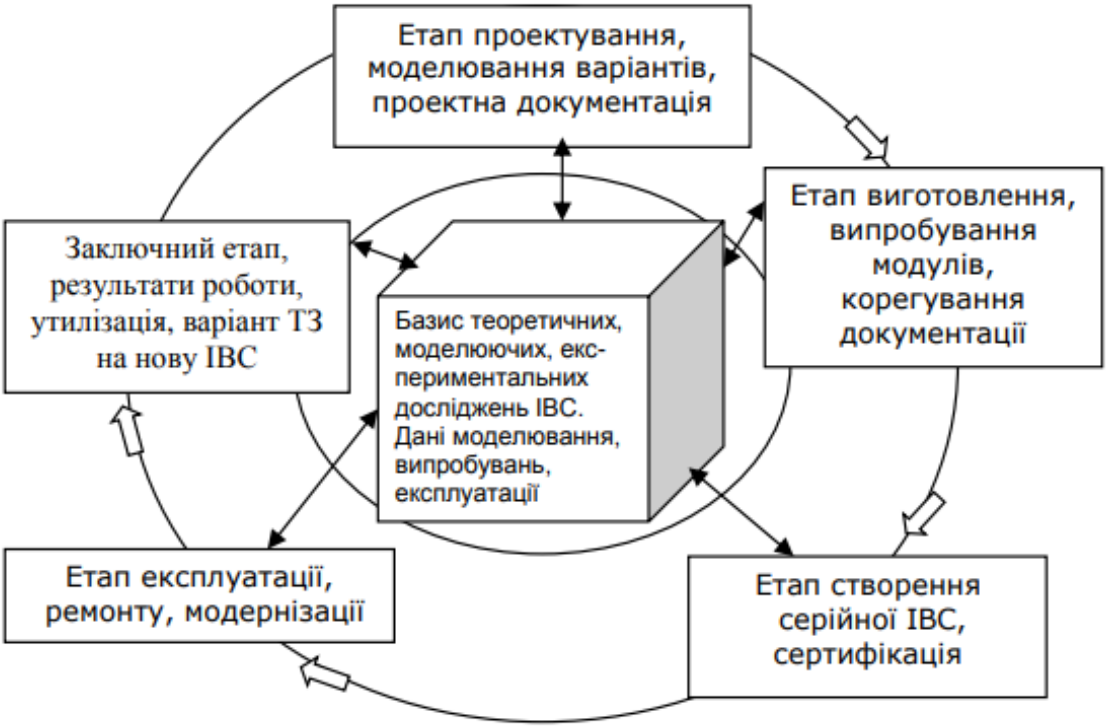


Рисунок 8.13 - Етапи життєвого циклу ІВС

Початковий етап. На початку створення ІВС (далі системи) виконується значний обсяг робіт з обґрунтування, розробки та узгодження технічного завдання на створювану систему між замовником і розробником системи. В технічному завданні на систему наведені всі технічні характеристики, в першу чергу, метрологічні, показники надійності, терміни виконання розробки системи, проведення випробувань, сертифікації та передачі системи в експлуатацію, вартість розробки системи. На цьому етапі використовуються останні досягнення теорії і практики вимірювань для оцінювання можливості розв’язання актуальних і важливих науково-технічних завдань вимірювань конкретної предметної області.

Етап проектування передбачає виконання значного обсягу теоретичних, імітаційних (моделюючих) та експериментальних (лабораторних) досліджень, на основі результатів яких обґрунтовується оптимальна апаратно-програмна структура системи. Для цього використовується ряд критеріїв (основні з яких спрямовані на досягнення заданої точність вимірювань), розробляються електричні схеми основних апаратних модулів і підсистем, зміст і структури алгоритмічно-програмного забезпечення,

технічна та конструкторська документація на виготовлення дослідних і серійних зразків системи, проводяться роботи з підготовки виробництва.

На цьому етапі обґрунтовуються, обчислюються і оцінюються розрахункові характеристики окремих модулів, підсистем і системи в цілому. Такі характеристики є базовими, використовуються на наступних етапах життєвого циклу системи та можуть доповнюватися даними лабораторних і натурних випробувань, експлуатації, коригуватися, уточнюватися, підтверджуватися статистичними гіпотезами з використанням критеріїв згоди. Отже на етапі проектування створюється методологія втілення подальших етапів життєвого циклу системи.

На рис. 8.14 наведені основні результати досліджень, які отримуються на етапі проектування на основі використання напрямів і методів ряду природничих і технічних наук.

Результати використання / Напрями, методи	Обгрунтування, обчислення, оцінювання результатів досліджень
Функціональний аналіз, обчислювальна математика, теорія ймовірностей, теорія випадкових функцій	Одновимірні та багатовимірні моделі сигналів, характеристики сигналів, алгоритми оцінювання характеристик сигналів, результати комп'ютерних вимірювальних експериментів, результати функціонування різних варіантів систем.
Теорія сигналів і систем	Оптимізація структур систем, результатів аналізу перетворень сигналів та опрацювання даних вимірювань, методик випробувань модулів, підсистем і систем в цілому на відповідність технічному завданню, резервування модулів, підсистем для забезпечення метрологічної надійності систем.
Теорія вимірювань	Оцінки результатів і невизначеності вимірювань, метрологічних характеристик, методик вимірювань.
Теорії інформації, методи захисту інформації	Оцінки кількості вимірюваної інформації, апаратно-програмні засоби захисту інформації
Математична статистика	Алгоритми перевірки адекватності моделей оцінки результату і невизначеність вимірювань, статистич-ні критерії

Рисунок 8.14 - Результати на етапі проектування

Автоматизація проектування є важливим фактором, що впливає на рівень працездатності складних технічних систем, оскільки дозволяє вирішити наступні завдання: істотно знизити кількість проектних помилок, підвищити якість конструкторської і технологічної документації, створити умови для багатоваріантного проектування і вибору оптимального варіанту, скоротити терміни проектування, вивільнивши певний час на до-

опрацювання технічних рішень, узгодження параметрів модулів та підсистем, проведення випробувань.

Етап виготовлення та випробування дослідних зразків модулів, підсистем ІВС. На етапі реалізуються:

методика і відповідні плани проведення випробувань з використанням засобів вимірювань для отримання експериментальних даних,

характеристик і параметрів інформаційних сигналів, метрологічних характеристик дослідних модулів, підсистем;

відповідна корекція алгоритмічно-програмного забезпечення для визначення метрологічних характеристик модулів і підсистем, а також характеристик математичних моделей за результатами порівняльного аналізу розрахункових і експериментальних характеристик.

За результатами досліджень проводиться коригування проектної та конструкторської документації на розробку серійного зразка системи.

На етапі створення серійного зразка, сертифікації та передачі ІВС в експлуатацію виконуються такі основні роботи:

підготовка виробництва для виготовлення серійних зразків системи з заданими метрологічними характеристиками;

реалізуються методики налагоджування різних модулів і підсистема перевірки функціонування системи для виконання заданих функцій;

випробування і сертифікація серійного зразка системи з використанням метрологічно атестованих вимірювальних (апаратних і програмних) засобів.

Етап експлуатації ІВС є найбільш тривалим в часі і передбачає такі роботи:

транспортування, налагодження і запуск в експлуатацію системи;

моніторинг функціонування системи в заданих режимах з використанням підсистем вимірювань, контролю, діагностики і управління;

формування бази даних вимірювань функціонування системи з наступним статистичним опрацюванням даних вимірювань характеристик, параметрів інформаційних сигналів;

реалізація методики довгострокового моніторингу та визначення прогнозованих метрологічних характеристик системи;

реалізація методики авторського нагляду та ремонту системи;

коригування математичного і програмного забезпечення варіантів модернізації діючої системи, проведення моделюючих експериментів і формування рекомендацій модернізації системи з метою підвищення ефективності її використання.

Заключний етап життєвого циклу ІВС є найбільш наукомістким в життєвому циклі ІВС і полягає у формуванні даних досліджень всіх етапів, їх систематизації та теоретичному аналізу з питань коректності використання математичного апарату, узагальнення результатів функціонування конкретного виду ІВС. Таке узагальнення результатів досліджень метрологічних характеристик слугує відповідним науковотехнічним, ін-

формаційним, математичним і програмним забезпеченням для створення нових перспективних ІВС.

На даному етапі виконується також роботи з утилізації ІВС як системи, яка вичерпала свій технічний ресурс.

Точність вимірювань. Результат вимірювань без оцінки його точності втрачає практичне значення.

На сьогодні у Міжнародній метрології відбувається еволюційний природний перехід оцінювання якості результатів вимірювань від концепції похибок (умовна назва) до концепції невизначеності (прийнята з 1993 року, як GUM 1993). Таке співставлення має аналогію з переходом від одної міжнародної системи одиниць до іншої.

Відомо, що так звану концепцію похибок називають ще класичною теорією похибок. Вона базується на постулаті існування істинного (точного) значення вимірюваної величини. Абсолютні значення похибки результату вимірювань визначають як різницю між результатом вимірювання величини і її істинним значенням. Використання концепції похибок дало змогу отримані важливі результати теорії і практики вимірювань які до початку XX століття сприяли розвитку вимірювань і метрології в цілому.

Невизначеність результату вимірювань. Сам термін «невизначеність вимірювань» означає сумнів стосовно достовірності результату вимірювання. Принциповою відмінністю даного показника якості результату вимірювань від традиційного полягає в наступному: достовірність результатів вимірювань з урахуванням похибок базується на отриманих в процесі проведення вимірювального експерименту даних вимірювань, відомих характеристик засобів вимірювань та умов проведення експерименту, іншої апріорної інформації. В концепції невизначеності такі поняття, як похибка і істинне значення вимірюваної величини замінюються поняттями невизначеність і оціночне значення вимірюваної величини, а поділ (класифікація) видів похибок за різними ознаками замінюється на поділ за способом оцінювання невизначеностей вимірювань за типом А, який ґрунтується на використанні методів математичної статистики, і за типом В – на використанні і інших методів.

Відповідність між показниками якості результатів вимірювань за концепціями похибок та невизначеності подано на рис. 8.15.

Рисунок 8.15 - Відповідність оцінок похибок і невизначеності результатів вимірювань

Методи оцінювання і способи відображення об'єктів невизначеності результатів вимірювань.

За методом оцінювання виділяють невизначеності:

типу А, до яких належать складові оцінювані статистичними методами опрацювання даних багаторазових вимірювань;

типу В, до яких відносяться складові, що оцінюються іншими методами опрацювання даних вимірювань.

За способом відображення виділяють:

стандартну невизначеність результату прямих вимірювань як стандартне середньоквадратичне відхилення (СКВ);

сумарну невизначеність як стандартну невизначеність результату непрямих вимірювань, яку отримують зі значень інших величин, пов'язаних з вимірюваною величиною функціональною залежністю;

розширену невизначеність як інтервальну оцінку вимірювань, яка оцінюється добутком стандартної невизначеності на коефіцієнт охоплення, який залежить від виду закону розподілу і рівнів заданих ймовірностей;

відносну невизначеність – відношення стандартної, сумарної або розширеної невизначеності до оцінки вимірюваної величини.

Класифікація ІВС. У нормативних документах метрології класифікація ІВС не наведена і це пояснюється наступним:

у класифікації ІВС необхідно чітко виділити класифікаційні ознаки, а це для всіх видів і поколінь ІВС зробити практично неможливо;

класифікацію ІВС можна лише умовно провести на певному етапі розвитку ІВС в зв'язку з динамікою змін елементної бази та ІВТ.

Наведена в рис 17.16 класифікація ІВС враховує тенденції сучасного інформаційного етапу розвитку систем вимірювань

Класифікація ІВС / Ознаки класифікації	Види ІВС
Функціональне призначення	Системи вимірювальні, автоматичного контролю, технічної діагностики, ідентифікації, розпізнавання образів управління, телеметричні, статистичні, поліметричні.
Режими (алгоритм) функціонування	Постійний, адаптований до динаміки змін величин і умов роботи об'єкта досліджень, віртуальний на основі методів математичного і комп'ютерного моделювання, інтелектуальний з можливостями перебудови структури і виконання функцій вимірювань.
Кількість і динаміка у просторі і часі вимірювальних величин	Одноканальні, багатоканальні, статичні, динамічні, реалізації ІВТ: ІВТ-1D, ІВТ-2D і ІВТ-3D

Рисунок 8.16 - Класифікація ІВС

Значна кількість ознак класифікації ІВС, які використовувались раніше, в тому числі: вид вихідної інформації; вид структурно-функціональної схеми системи; види діалогового режиму оператор-система та інші інтегровані в класифікації ІВС.

Апаратно-програмна реалізація ІВС. Аналізуючи функціонування різних видів ІВС, відзначимо, що всі системи в своєму складі мають вимірювальний канал, як базову і типову підсистему ІВС. Саме вимірювальний канал (ВК) є найбільшою структурною одиницею ІВС, метрологічні характеристики (МХ) якої нормуються.

Вимірювальний канал – конструктивно або функціонально виділена частина ІВС, що виконує закінчену функцію від сприйняття вимірюваної величини до отримання її результату вимірювань, який відображається числом або відповідним йому кодом, або формуванням відповідного аналогового сигналу, один з параметрів якого є функцією значення вимірюваної величини.

Апаратна частина ВК. Структура ВК в більшості випадків є типовою і являє собою послідовне з'єднання різного роду модулів засобів вимірювань. Узагальнена структура ВК ІВС представлена на рис. 8.17.

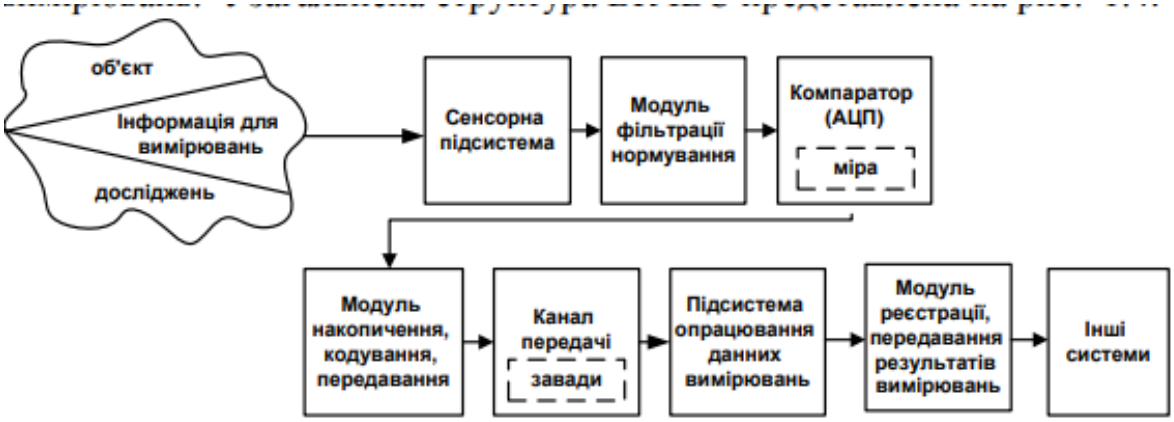


Рисунок 8.17 - Узагальнена структура ВК ІВС

У сенсорну підсистему ВК входять сенсори (первинні вимірювальні перетворювачі), підсилювачі і фільтри, які у сукупності перетворюють інформацію для вимірювань об’єкта досліджень у вимірювальний сигнал, зазвичай електричний. У теорії ІВС виділений науково-технічний напрям досліджень - сенсорна електроніка. У рамках цього напряму розробляються нові сенсори фізичних величин, хімічні сенсори, біосенсори, радіаційні, оптичні та оптоелектронні сенсори, акустоелектронні сенсори, наносенсори і ін. За особливостями функціонування сенсори поділяють на: лінійні або нелінійні; інерційні або безінерційні; з інваріантними (незалежними від зміни певних параметрів і характеристик об’єкту досліджень) або неінваріантними параметрами в часі і / або в просторі. Тому під час оцінювання функціонування ВК ІВС, в першу чергу, проводять аналіз сенсора як одного з основних модулів ВК.

Другий модуль ВК забезпечує підсилення, фільтрацію (узгоджену, оптимальну) з метою зменшення впливу завад, коригування (лінеаризацію) функції перетворення сенсора, зменшення адитивних і мультиплікативних похибок перетворень, нормування вимірювальних сигналів.

У сучасних ІВС як компаратор використовуються аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП). Характеристики АЦП, в першу чергу, частота дискретизації і крок (рівень) квантування за інтенсивністю вимірювальних сигналів, узгоджуються із завданням вимірювання і вибираються на основі аналізу метрологічних характеристик існуючих АЦП.

У загальному випадку отримані з виходу АЦП дані вимірювань в модулі ВК накопичуються, кодуються з метою захисту інформації для подальшого передавання по каналу передачі даних вимірювань.

Як канали зв’язку використовуються: оптоволоконні, лінії зв'язку; радіоканали; високовольтні лінії електропередачі з відповідною каналоутворюючою апаратурою; акустичні і гідроакустичні канали та ін.

Підсистема опрацювання даних вимірювань з відповідним інтерфейсом забезпечує приймання, декодування і опрацювання даних вимірювань з метою отримання результату вимірювань.

Програмна частина ІВС. Розглядаючи ІВС як єдиний апаратно-програмний комплекс виходять з того, що «м'яке обладнання», до складу якого входить функціональне інформаційне, математичне і програмне забезпечення (відповідно ІЗ, МЗ і ПЗ)) не є самостійними об'єктами і працюють тільки у складі ІВС. Тому працездатність «м'якого обладнання» здебільшого оцінюється не окремо, а за результатами роботи ІС в цілому.

Програмна частина системи має характерні особливості:

вона не схильна до зношування;

якщо виявлені в процесі налагодження і дослідної експлуатації ПЗ помилки усуваються, а нові не вносяться, то такий об'єкт розглядається як «нестаріюча» система (за термінологією теорії надійності);

працездатність програм значною мірою залежить від використовуваної вхідної інформації, оскільки від неї залежить результат реалізація програми; якщо вхідна інформація сама містить дефекти, програма видасть помилковий результат і за відсутності помилок програми;

якщо помилки, що виникають під час роботи, не діагностувати і не усувати, то помилки ПЗ будуть мати систематичний характер;

працездатність ПЗ залежить від області застосування ІВС; у випадку розширення діапазону функціонування або зміні області застосування ІВС працездатність може істотно змінюватися без зміни ПЗ.

Ефективність функціонування апаратної частини ІВС оцінюють шляхом опрацювання статистичних даних за результатами експлуатації певної кількості однотипних зразків ІВС. Можливості використання такого підходу для програмного продукту обмежені, оскільки копії програмного забезпечення ідентичні і разом з їх копіюванням вносяться і одинакові дефекти – проектні помилки. Існує й інша можливість використання попереднього досвіду функціонування ПЗ. Характеристики числа допущених проектних помилок є досить стійким показником якості роботи сформованого колективу програмістів і використовуваних ними засобів проектування ПЗ. Реєстрація відомостей про проектні помилки у всіх раніше виконаних проекта та їх відповідне статистичне опрацювання дає можливість отримати заслуговуючи на довіру вихідні дані для оцінювання працездатності нового ПЗ. Якщо такі дані відсутні, то використовують більш загальні відомості про процес проектування ПЗ або дані результатів налагодження ПЗ розроблюваного проекту. Щоби за цими даними оцінити працездатність ПЗ, розробляють і досліджують відповідні моделі узгоджені з певним етапом життєвого циклу програми.

На ранніх стадіях проектування використовують опис алгоритмів за входами і виходами (опис «чорного ящика») або структуру алгоритму як сукупність структурних елементів і опис кожного з них за за входами і виходами (опис «білого ящика»). Після розроблення текстів програм, можна використовувати параметри програм: словник мови програмування, кількість операцій, операндів, використовуваних підпрограм, локальних міток і ін.

У процесі налагодження та експлуатації ПЗ, коли з'являються статистичні дані про виявлені дефекти, вихідне число дефектів як одну з важливих характеристик якості програмування оцінюють методами математичної статистики.

Моделі працездатності ПЗ і методи її оцінювання поділяються на дві групи:

моделі і методи проектного оцінювання працездатності, що ґрунтуються на вихідних даних, які можна отримати до початку налагодження та експлуатації програм;

моделі і методи статистичного оцінювання працездатності ПЗ, що ґрунтуються на результатах налагодження на етапах дослідної або нормальної експлуатації ІВС.

Як вихідні дані використовуються структурна схема функціонального ПЗ для кожної функціональної самостійної операції, а також опис входів і виходів кожного структурного елементу, між модульних і зовнішніх зв’язків комплексу алгоритмів і програм. Типова структура функціонального ПЗ має у своєму складі ПЗ верхнього і нижнього - рівнів. У свою чергу типова структура функціонального ПЗ нижнього рівня спрямована на опрацювання даних, введення і виведення даних і т. ін.

Кожен алгоритм може бути поділений на секції (модулі) певного розміру відповідно до рекомендацій технології програмування. На ранніх етапах проектування в умовах значної невизначеності до структурних характеристик додають ще рівень використовуваних мов програмування. На більш пізніх етапах, коли вже розроблені тексти програм, можуть бути використані методики проектного оцінювання програмних модулів, а в подальшому і ПЗ в цілому.

Типова структура програмного забезпечення ІВС представлена на рис. 8.18. За функціональним призначенням всі модулі ПЗ поділяються на чотири групи: взаємодії з модулями системи, виділення первинних інформативних параметрів, статистичного опрацювання даних і керування процесом вимірювання.

Програмні модулі взаємодії з компонентами системи забезпечують програмне узгодження цих модулів з ПЗ системи в цілому. Взаємодія ПЗ із апаратними засобами ІВС реалізується шляхом послідовного виклику функцій, які відповідають різним завданням –ініціалізації окремих підсистем, отриманню службових даних, налаштуванню динамічного діапазону та частоти опитування, запуску процедури збирання даних, очікуванню відповіді, отриманню вибірок інформаційного сигналу та завершенню роботи.

Рисунок 8.18 - Типова структура програмного забезпечення ІВС

Крім того ці модулі реалізують такі операції:

пошук підключеного пристрою;

отримання ідентифікатора пристрою;

конфігурування та запуск процесу перетворення;

перевірку поточного стану процесу збору інформації та передавання сигналу про його завершення;

зчитування отриманих даних та передавання їх для подальшого опрацювання;

зупинку процесу збирання даних та завершення сеансу роботи з пристроєм.

Програмні модулі виділення первинних інформативних параметрів забезпечують накопичення первинних даних і їх передавання в інші модулі ПЗ системи для подальшого статистичного оброблення, побудови розподілів інформаційних полів, графічного представлення даних (наприклад, відео та теплових зображень), локалізації місць з перевищенням граничних значень контрольованого параметра, автоматичного розпізнавання класів даних, що відповідають різним станам об’єкта досліджень. Зокрема модуль накопичення первинних даних виконує зберігання вхідних інформаційних масивів даних, зменшення їхньої розмірності за рахунок відбору певних діагностичних ознак, які використовуються для подальшого опрацювання, що дає можливість підвищити ефективність опрацювання даних та роботи системи в цілому, а також нормування вхідних даних для приведення його до заданого діапазону значень.

Модуль опрацювання графічних (відео, теплових полів, розподіл параметрів електромагнітних полів у просторі) даних реалізує наступні алгоритми роботи із зображеннями – підвищення просторової розрізнювальної здатності, підвищення контрастності, фільтрації зображень, ви-

ділення геометричних примітивів, прив'язки до еталонів. Крім того, даний модуль дозволяє проводити геометричні вимірювання з використанням зображень в 2D і 3D просторах для локалізації координат і розмірів об'єктів та його окремих зон (наприклад, дефектів).

Модуль розпізнавання класів даних здійснює класифікацію вхідних даних за певними заданими ознаками, розбиття множини векторів-ознак на кластери та розпізнавання різних класів (образів). Такі модулі можуть розроблятись на основі нейромережевих технологій, які дозволяють будувати правила прийняття рішення за мінімально можливого обсягу експериментальних даних.

Суттєве функціональне навантаження в ІВС мають модулі статистичного опрацювання експериментальних даних.

Модуль попереднього цензурування даних вимірювань призначено для зменшення впливу вибіркових значень з надлишковими похибками та виявлення прогресуючих чи періодичних трендів. Перша задача вирішується фільтрацією даних, наприклад віконною чи медіанною, в залежності від розмірності вхідного вектору, або застосуванням статистичних критеріїв, які для заданої довірчої ймовірності дозволяють розрахувати граничні вибіркові значення.

Ідентифікація законів розподілу експериментальних даних необхідна для підтвердження факту їх однорідності та вибору моделі інформаційних параметрів та характеристик, а також може бути використана як діагностична ознака. Модуль ідентифікації законів розподілу може використовувати різні статистичні інструменти, наприклад направлені критерії перевірки на гауссовість, на рівномірність, апроксимацію законів розподілу лінійних даних кривими Пірсона тощо.

Модуль визначення вибіркових статистик оцінює статистичні параметри експериментальних даних з урахуванням визначеного закону розподілу для подальшого використання в розрахунках характеристик вимірюваних параметрів чи полів або прогнозу стану об'єкта вимірювання (контролю). Поля інформаційних параметрів можна будувати як в декартових, так і в полярних координатах.

Програмний модуль визначення характеристик полів дозволяє отримувати зображення полів у 3D просторі, а також досліджувати зміну їх характеристик у часі.

Модуль розрахунку прогнозу здійснює побудову регресійної моделі поведінки вимірюваних параметрів в часі (наприклад, на основі сплайн - апроксимації експериментальних даних).

Модулі керування процесом вимірювання забезпечують задане керування режимами роботи ІВС, в тому числі і в інтерактивному режимі, відображення результатів вимірювань із застосуванням 2D і 3D графіки, налаштування та калібрування окремих складових ІВС та проведення їх діагностики.

Характерні властивості і приклад апаратно-програмної реалізації сучасних ІВС. Аналіз різноманітних і різнопланових завдань вимірювань

широкого кола предметних областей застосування різних видів ІВС не дає практичної можливості представити схематично узагальнену структуру ІВС, тобто у кожному конкретному випадку апаратно-про8грамна реалізація ІВС має свою специфіку і характерні особливості. Але послідовність операцій перетворення інформації для вимірювання об'єкта досліджень у результат вимірювань на основі використання функціональних модулів формування і опрацювання даних вимірювань ІВС дає можливість визначити апаратний склад системи. У залежності від кількості та динаміки у просторі і часі вимірювальних величин (n величин), загальна структура ІВС включає n вимірювальних каналів, апаратна і програмна частина одного з них була описана вище.

Апаратна частина ІВС. Наведемо перелік апаратних модулів, які можуть бути включені в структури різних видів ІВС:

множина різних сенсорів або сенсорних модулів, які розміщені стаціонарно, або можуть переміщатись у просторі по заданому закону;

множина вимірюваних перетворювачів;

групи АЦП ЦАП та аналогових пристроїв допускового контролю;

множина цифрових пристроїв, яка включає пристрої формування імпульсів, перетворення кодів, комутатори, спеціалізовані цифрові обчислювані пристрої, пристрої пам'яті, пристрої порівняння кодів, канали цифрового зв'язку, універсальні обчислювальні пристрої – мікропроцесори, мікроконтролери тощо;

група цифрових пристроїв виводу, відображення і реєстрації;

інтерфейсні пристрої, які включають системи шин, інтерфейсні вузли і інтерфейсні пристрої аналогових блоків, які забезпечують приймання сигналів управління і передачі інформації про стан блоків;

пристрої управління, які забезпечують формування, приймання сигналів управління і їх передачу на виконуючі пристрої, для здійснення впливу на об'єкт дослідження.

Наведені вище функціональні модулі з'єднуються між собою безпосередньо або через стандартні інтерфейси за умови сумісності їх інформаційних, метрологічних, конструктивних, енергетичних та експлуатаційних характеристик.

Необхідність розроблення і удосконалення ІВС обумовлює потребу постійного розвитку теоретичних засад їх створення і функціонування, що стимулює процес включення нових областей знань, необхідних для вирішення актуальних завдань вимірювань.

Вимірювання відіграють важливу роль у розвитку економіки, науки і техніки. Теоретичні основи ІВС є одним із напрямів теорії вимірювань, а ІВС є основним засобом забезпечення єдності вимірювань на практиці.

Об'єктами вимірювань є значна множина явищ, процесів, систем різної природи в значній кількості предметних областях.

Предметами вимірювання є моделі, методи, способи, технічні, інформаційні, програмні та інші засоби забезпечення єдності вимірювань.

Існують три основні завдання вимірювань: гомоморфне відображення інформації для вимірювань об’єкта досліджень у фізичній та математичній моделі, використання однорідності у просторі і стаціонарності у часі мір при проведенні процесів вимірювання та забезпечення захисту інформації. Вирішення вказаних завдань вимірювань об’єднують на базі застосування фізичних і математичних моделей. Математичні моделі вимірюваних сигналів у загальному виді відображають динаміку у просторі і часі вимірювальних величин (фізичних величин).

Класифікація ІВС базується на використанні трьох основних ознак: функціонального призначення; режимів (алгоритмів) функціонування; кількості і динаміки у просторі і часі вимірювальних величин.

Типові несправності електронних приладів і вимірювальних перетворювачів (продовження)

Несправності перетворювачів із змінним активним опором (реостатні та тензорезистивні)

Типові несправності:

– Знос або окиснення контактного повзунка → нестабільний контакт, стрибкоподібні зміни сигналу.

– Пошкодження намотки реостата (обрив, локальний перегрів).

– Деградація клейового шару або механічне відшарування тензодатчика від поверхні.

– Дротові тензорезистори — поява мікротріщин у дроті через втомні навантаження.

– Зміна опору через вплив температури або підвищеної вологості.

– Методи діагностики:

– Вимірювання опору по всій довжині переміщення повзунка (виявлення «провалів»).

– Перевірка стабільності сигналу під навантаженням (динамічна характеристика).

– Термографія для виявлення локального перегріву.

– Мостові схеми для діагностики тензодатчиків (небаланс моста).

– Візуальний контроль поверхні датчика та повзункового механізму.

Відновлення працездатності:

– Очищення та заміна контактного повзунка.

– Репозиціювання або повторне наклеювання тензорезистора за технологією виробника.

– Локальна заміна намотки або заміна всього перетворювача.

– Корекція температурної компенсації.

Індуктивні та індукційні перетворювачі

На основі аналізу принципу роботи (зміна індуктивності або ЕРС у магнітному полі), типові проблеми стосуються магнітопроводу, обмоток і зазорів .

Типові несправності:

– Зміна величини повітряного зазору через механічне зміщення частин.
– Пошкодження ізоляції обмоток (перегрів, волога).
– Ослаблення магнітів у індукційних тахогенераторах.
– Металевий пил або забруднення в зазорі → зміна індуктивності.
– Вібраційні пошкодження корпусу та кріплень.

Методи діагностики:

– Вимірювання індуктивності на різних частотах (L=f).
– Перевірка симетричності сигналів та їхніх гармонік.
– Осцилографування ЕРС індукційних датчиків швидкості.
– Перевірка опору обмоток і міжвиткових коротких замикань.

Відновлення працездатності:

– Очищення механізму; відновлення геометрії зазору.
– Перемотування обмоток.
– Заміна ослаблених магнітів.
– Герметизація для боротьби з вологістю.

Взаємоіндуктивні (трансформаторні) перетворювачі

Перетворювачі положення та куту (рис. 8.5) мають складну структуру з первинною та вторинними обмотками, що зумовлює відповідні несправності .

Типові несправності:

– Деградація ізоляції вторинних обмоток.
– Симетричні/несиметричні відмови фаз (порушення фазового зсуву).
– Механічне зміщення рухомих частин.
– Зміни магнітної проникності осердя через підвищену температуру.

Методи діагностики:

– Вимірювання ЕРС вторинних обмоток при відомому положенні рухомої частини.
– Аналіз фазових характеристик сигналів.
– Контроль гармонічного складу.
– Перевірка опору та індуктивності кожної обмотки.

Відновлення працездатності:

– Перемотування обмоток.

– Відновлення співвісності та механічного центрування.
– Термообробка або заміна осердя при деградації матеріалу.

Ємнісні датчики

Вони чутливі до змін геометрії, діелектрика та забруднення (рис. 8.6) .

Типові несправності:

– Зміна відстані між електродами внаслідок механічних деформацій.
– Попадання вологи, електропровідних частинок на електроди.
– Порушення ізоляції та коротке замикання.
– Зміна діелектричної проникності через забруднення або відкладення матеріалу.

Методи діагностики:

– Вимірювання ємності при різних частотах.
– Перевірка витоку та опору ізоляції.
– Огляд електродів на предмет корозії та осадів.
– Осцилографічний аналіз сигналу у регуляторі рівня або положення.

Відновлення працездатності:

– Очищення електродів.
– Відновлення або заміна ізоляційного шару.
– Заміна пошкоджених електродів.
– Перекалібрування після монтажу.

Теплові перетворювачі (термопари та терморезистори)

Будову та принцип дії термопар і терморезисторів (рис. 8.7, 8.8) та вплив температури і середовища на їхні характеристики .

Типові несправності:

– «Зсув нуля» термопари через корозію або дифузію металів.
– Обрив або коротке замикання в місці зварювання термопари.
– Пошкодження ізоляційних керамічних втулок.
– Порушення герметичності металевої арматури.
– Деградація платинових датчиків через забруднювачі.
– У напівпровідникових терморезисторів — нелінійні відхилення, старіння, нестабільність.

Методи діагностики:

– Вимірювання ЕРС термопари при контрольних температурах.
– Порівняння показань із еталонним датчиком.
– Перевірка опору терморезистора та його температурного коефіцієнта.
– Термографія.
– Перевірка ізоляції між електродами.

– Відновлення працездатності:
– Замінна термопари або ремонт зварної точки.
– Заміна пошкодженої арматури або ізоляції.
– Калібрування терморезистора.
– Демонтаж датчика при ознаках дифузії або окиснення.

Електрохімічні перетворювачі (датчики провідності, концентрації)

Конструкція таких датчиків (рис. 8.9) передбачає роботу з рідинами, що створює специфічні відмови .

Типові несправності:

– Наліт, солеві або хімічні відкладення на електродах.
– Корозія металевих електродів.
– Зміна геометрії або площі електродів.
– Утворення газових пухирців на поверхні (електроліз).
– Руйнування ізоляційного матеріалу трубки.
– Порушення температурних умов → спотворення показань.

Методи діагностики:

– Вимірювання опору комірки при відомій концентрації розчину.
– Перевірка струму витоку.
– Візуальний огляд електродів.
– Перевірка герметичності корпусу.

Відновлення працездатності:

– Хімічне очищення електродів.
– Заміна електродів з ознаками ерозії.
– Відновлення ізоляції.
– Корекція або заміна температурного датчика, що входить до складу перетворювача.

Фотоелектричні датчики (фотоелементи, фоторезистори, вентильні фотоелементи)

Докладний опис типів фотоелементів, їх спектральних і динамічних характеристик, а також їхню схильність до старіння (рис. 8.10–8.12) .

Типові несправності:

– Зниження чутливості фотоелемента (особливо газонаповнених).
– Порушення вакууму або витік інертного газу.
– Руйнування катодного покриття.
– Старіння фоточутливих шарів.
– Волога та пил → зміна опору фоторезистора.
– Механічні пошкодження віконця.

Методи діагностики

– Вимірювання світлової та спектральної характеристики.
– Порівняння струму при стандартній освітленості.

– Перевірка вольт-амперної характеристики.
– Тестування швидкодії.

Відновлення працездатності:

– Заміна фотоелемента (переважний варіант).
– Очищення оптичної поверхні.
– Встановлення світлофільтрів або екранів при надмірному освітленні.

Загальні несправності електронних систем автоматизації електроприводу

Несправності модулів обробки сигналів (підсилювачі, фільтри, АЦП/ЦАП):

– Вихід з ладу операційних підсилювачів.
– Шум, дрейф нуля, зміна коефіцієнта підсилення.
– Порушення частотної характеристики фільтрів.
– Помилки квантування та збої АЦП/ЦАП.
– Збої у живленні (просадка напруги, пульсації).

Діагностика: тестові сигнали, осцилографія, аналіз частотних характеристик, температурні тести.

Відновлення: заміна мікросхем, репайр пайки, стабілізація БЖ.

Несправності інтерфейсів та систем збору даних

– Втрата зв’язку з датчиком.
– Нестабільні показання через перешкоди в лінії.
– Порушення ізоляції кабелю.
– Некоректне кодування даних.

Діагностика: тестування кабельних ліній, аналіз протоколів, використання діагностики ІВС з файлу (рис. 8.17–8.18).

Відновлення: заміна кабелю, налаштування інтерфейсу, фільтрація сигналу.

Несправності програмного забезпечення

На основі підрозділу про ПЗ ІВС можна сформувати такі типові відмови:

– Логічні помилки алгоритмів.
– Невірна обробка вхідних даних, «закидання» діапазону.
– Нестиковки з апаратними модулями.
– Збої після оновлень або зміни конфігурації.

Діагностика: логування, трасування, тестування граничних умов.

Відновлення: корекція алгоритмів, оновлення ПЗ, валідація даних.

Загальні методи діагностики систем автоматизації електроприводу

Основні методи:

– Осцилографічний аналіз.

– Вимірювання статичних характеристик (R, L, C).

– Перевірка динамічних характеристик (час відгуку, амплітудно-частотні криві).

– Термографія.

– Порівняння з еталонними датчиками.

– Діагностика через вбудовані функції ІВС (self-test, віддалений моніторинг).

– Моделювання та порівняння із розрахунковими характеристиками.

Методи відновлення працездатності.

Основні підходи:

– Калібрування — після ремонту або виявлення зсуву характеристик.

– Ремонт контактних та рухомих частин — повзунків, електродів, магнітних систем.

–

– Заміна деградованих елементів — фоточутливих шарів, ізоляції, обмоток.

– Герметизація та захист — від вологи, пилу, агресивних середовищ.

– Оптимізація алгоритмів ПЗ — усунення систематичних похибок.

– Комплексна діагностика ІВС — згідно з принципами побудови вимірювальних каналів (рис. 8.17).

Висновки.

1. Електронні прилади та вимірювальні перетворювачі є ключовими елементами систем автоматизації електроприводу, забезпечуючи точний контроль параметрів процесу, стану обладнання та режимів роботи приводу. Їхня надійність визначає якість керування, стабільність технологічного циклу та безпеку експлуатації.

2. Усі типи перетворювачів — активні, індуктивні, індукційні, взаємоіндуктивні, ємнісні, теплові, електрохімічні та фотоелектричні — мають специфічні фізичні принципи роботи, а отже й характерні несправності, пов’язані з деградацією матеріалів, впливом температури, вологості, вібрацій та електромагнітних завад.

3. У реостатних і тензорезистивних датчиках основними проблемами є зміна опору через механічний знос, ослаблення контактів та вплив температури. У індуктивних та індукційних – порушення геометрії магнітних зазорів, деградація обмоток, зменшення магнітних властивостей матеріалів.

4. Для ємнісних сенсорів критичним є стан діелектрика та поверхні електродів, а для термопар і терморезисторів — корозія, відшаруван-

ня ізоляції, зворотна дифузія металів та похибки через температуру навколишнього середовища.

5. Електрохімічні датчики найбільш уразливі до хімічної корозії та утворення відкладень на електродах. Фотоелементи — до старіння, забруднення та деградації фоточутливих шарів.

6. Підсистеми обробки сигналів (фільтри, підсилювачі, АЦП/ЦАП) та програмне забезпечення ІВС також можуть бути джерелом похибок та нестабільності, особливо за наявності шумів, нестабільного живлення або дефектів алгоритмів.

7. Ефективна діагностика базується на поєднанні методів: вимірювання електричних параметрів, аналізу сигналів, термографії, співставлення з еталоном, застосування вбудованих засобів самодіагностики ІВС.

8. Відновлення працездатності включає очищення, заміну пошкоджених елементів, ремонт електричних з'єднань, перекалібрування та корекцію алгоритмів. У ряді випадків доцільною є повна заміна сенсора.

Контрольні питання.

1. Яка роль електронних приладів у системах автоматизації електроприводу?
2. У чому полягає принцип роботи реостатних перетворювачів?
3. Які типові несправності тензорезистивних датчиків і з чим вони пов'язані?
4. Чому індуктивні перетворювачі чутливі до зміни геометрії магнітного зазору?
5. Які ознаки несправності індукційних тахогенераторів?
6. У чому полягає основна проблема експлуатації ємнісних датчиків?
7. Які пошкодження можуть виникати в термопарах під час тривалої роботи?
8. Чому електрохімічні датчики мають використовуватись тільки з джерелами змінного струму?
9. Які фактори спричиняють старіння фотоелементів?
10. Які методи застосовуються для діагностики датчиків положення?
11. Які характерні ознаки міжвиткового короткого замикання в індуктивних обмотках?
12. Які алгоритмічні збої можуть впливати на точність роботи ІВС?
13. Які основні етапи діагностики системи збору даних?
14. Чому важливо проводити порівняння характеристик сенсорів з еталонними даними?
15. Які методи відновлення працездатності застосовують для теплових перетворювачів?
16. Які особливості діагностики фотоелектричних сенсорів?

17. Як впливають вібрації на точність вимірювальних перетворювачів?

18. Які критерії визначають доцільність ремонту або заміни датчика?

19. Які загальні вимоги до технічного обслуговування електронних приладів?

20. Як використовується термографія у діагностиці електронних систем?

Використана література.

1. Гнусов Ю. В., Тулупов В. В., Пересічанський В. М. Метрологія та вимірювання : навчальний посібник / Харк. нац. ун-т внутр. справ. Харків, 2019. 125 с.

2. Защепкіна Н. М. Метрологія : навчальний посібник для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 397 с.

3. Метрологія, вимірювання, прилади: навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузей знань 14 "Електрична інженерія", 15 "Автоматизація та приладобудування", 13 "Механічна інженерія" / уклад.: І. Ю. Черепанська та ін. Житомир : Поліс. нац. ун-т, 2021. 155 с.

4. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Є. А. Вимірювання параме-трів електричних кіл : навчальний посібник для студентів спец. 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка". Харків : НТУ "ХПІ", 2020. 165 с.

5. Метрологія та основи вимірювань : навчально-методичний посібник для студентів спец. 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка" / за ред. А. К. Бабіченка. Харків : Мірошниченко О. А., 2023. 140 с.

6. Воробець М. М., Кондрачук І. В. Стандартизація, сертифікація, ме-трологія та управління якістю : навчальний посібник. Чернівці : ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2022. 103 с.

7. Янчук І. В., Галунка О. Д., Сумарюк О. В. Метрологія і стандартизація : конспект лекцій. Чернівці : ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2021. 103 с.

8. Макота О. І., Олійник Л. П., Комаренська З. М. Метрологія, станда-ртизація, сертифікація та акредитація : навчальний посібник. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2019. 171 с.

ТЕМА 9. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПРИ РЕМОНТІ Й ТЕХНІЧНОМУ ОБСЛУГОВУВАННІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ (МУЛЬТИМЕТРИ, МЕГАОММЕТРИ, СТРУМОВІ КЛІЩІ, ТЕПЛОВІЗОРИ, ВІБРОАНАЛІЗАТОРИ).

Огляд приладів для діагностики електрообладнання: мультиметри, мегаомметри, струмові кліщі, тепловізори, віброаналізатори. Методи оцінки технічного стану обладнання.

Загальні положення

Контроль параметрів електрообладнання є ключовою складовою забезпечення надійності, безпеки та енергоефективності виробничих процесів. Своєчасні вимірювання електричних, теплових і механічних параметрів дають змогу:

- виявляти дефекти на ранніх стадіях;
- попереджати аварійні відмови;
- оптимізувати планово-попереджувальні ремонти;
- обґрунтовувати рішення щодо модернізації або заміни обладнання.

Мультиметри

Рисунок 9.1 - Зовнішній вигляд мультіметрів

Призначення. Універсальні прилади для вимірювання напруги, струму, опору, перевірки цілісності кіл, діодів, ємності, частоти.

Особливості застосування в обслуговуванні:

- контроль живильних кіл та сигналів керування;
- перевірка справності елементів схем;
- пошук обривів і коротких замикань.

Ключові параметри вибору: клас точності, True RMS, категорія безпеки (CAT II–IV), діапазони вимірювань, захист від перевантажень.

Мегаомметри

Рисунок 9.2 – Зовнішинй вигляд мегаометрів

Призначення. Вимірювання опору ізоляції електричних машин, кабельних ліній, трансформаторів.

Методичні аспекти:

- вимірювання проводиться при підвищеній випробувальній напрузі (250–5000 В);
- оцінюється абсолютне значення опору та його динаміка у часі.

Практичне значення: раннє виявлення зволоження, старіння або пошкодження ізоляції.

Струмові кліщі

Рисунок 9.3 – Зовнішинй вигляд струмові кліщі

Призначення. Безконтактне вимірювання струму в провідниках без розриву кола.

Основні сфери використання:

- контроль навантаження електродвигунів;
- виявлення перевантажень і перекосів фаз;
- оперативна діагностика в діючих установках.

Переваги: безпека, швидкість, можливість вимірювання великих струмів.

Тепловізори

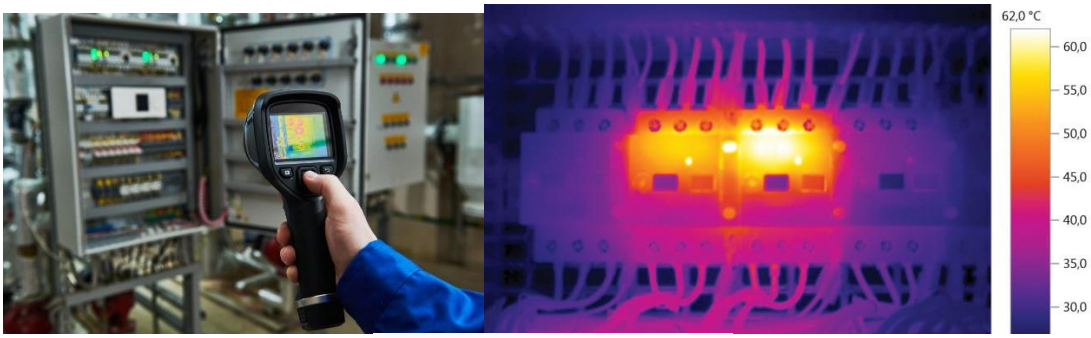


Рисунок 9.4 – Зовнішинй вигляд тепловізора

Призначення. Безконтактний контроль температурного стану елементів електрообладнання.

Діагностичні можливості:

- виявлення перегрівів контактів, шин, обмоток;
- контроль нерівномірності теплових полів;
- оцінка стану підшипників та механічних вузлів.

Перевага методу: дистанційність і можливість роботи без зупинки обладнання.

Віброаналізатори

Рисунок 9.5 – Зовнішинй вигляд віброаналізатора

Призначення. Контроль механічного стану електромеханічних систем.

Інформаційні показники:

- рівень та спектр вібрації;
- характерні частоти дефектів;
- зміна параметрів у часі.

Застосування: діагностика підшипників, дисбалансу ротора, розцентрування валів.

Методи оцінки технічного стану електрообладнання

Комплексна оцінка базується на поєднанні результатів різних вимірювань:

- **електричні методи** (опір, струм, напруга, ізоляція);
- **теплові методи** (термографія);
- **механічні методи** (вібраційний аналіз);
- **трендовий аналіз** (порівняння результатів у часі).

Такий підхід забезпечує підвищену достовірність діагностики та обґрунтованість технічних рішень.

Використання сучасних вимірювальних і діагностичних приладів є обов’язковою умовою ефективного ремонту та технічного обслуговування електрообладнання. Комплексне застосування мультиметрів, мегаомметрів, струмових кліщів, тепловізорів і віброаналізаторів дозволяє забезпечити високий рівень надійності, безпеки та економічної ефективності експлуатації промислових електроприводів і електроустановок.

Висновки.

1. Систематичне застосування вимірювальних і діагностичних приладів є необхідною умовою надійної та безпечної експлуатації електрообладнання.

2. Мультиметри забезпечують універсальний контроль електричних параметрів і є базовим інструментом під час технічного обслуговування та ремонту.

3. Мегаомметри дозволяють оцінювати стан ізоляції електричних машин, кабельних ліній і апаратів, що є критичним фактором електробезпеки.

4. Струмові кліщі забезпечують оперативний і безпечний контроль навантаження без розриву електричного кола.

5. Тепловізійний контроль дає можливість виявляти приховані дефекти за температурними аномаліями без зупинки обладнання.

6. Віброаналіз є ефективним методом діагностики механічного стану електромеханічних систем та раннього виявлення дефектів обертових вузлів.

7. Найвищу достовірність оцінки технічного стану електрообладнання забезпечує комплексне застосування електричних, теплових і механічних методів діагностики.

8. Результати вимірювань повинні використовуватися не лише для фіксації поточного стану, а й для трендового аналізу та планування ремонтних заходів.

Контрольні питання.

1. Яка роль вимірювальних приладів у системі технічного обслуговування електрообладнання?

2. Які основні функції та параметри промислових мультиметрів?

3. У чому полягає принцип вимірювання опору ізоляції мегаомметром?

4. Які вимоги безпеки необхідно дотримуватися під час роботи з мегаомметрами?

5. Які переваги мають струмові кліщі порівняно з прямими методами вимірювання струму?

6. Які дефекти електрообладнання можна виявити за допомогою тепловізора?

7. Які основні параметри оцінюються під час вібраційної діагностики електромеханічних систем?

8. Як за результатами вимірювання струму можна оцінити режим роботи електродвигуна?

9. Чому трендовий аналіз результатів вимірювань є важливим для прогнозування відмов?

10. У яких випадках доцільно поєднувати електричні, теплові та механічні методи діагностики?

11. Як результати тепловізійного контролю використовуються для планування ремонтних робіт?

12. Які чинники впливають на точність і достовірність вимірювань у процесі експлуатації електрообладнання?

ТЕМА 10. ДОКУМЕНТУВАННЯ РЕМОНТНИХ І СЕРВІСНИХ РОБІТ.

Графіки ППР, технічні паспорти, акти та звіти Правила ведення експлуатаційної документації. Графіки планово-попереджувальних ремонтів (ППР). Акти випробувань та звіти. Технічні паспорти обладнання.

Місце документації в системі технічної експлуатації

Документування ремонтних і сервісних робіт є елементом системи управління технічним станом обладнання, а не нормативної системи безпеки праці.

У технічній експлуатації документація виконує такі функції:

- фіксація фактичного технічного стану обладнання;
- забезпечення наступності технічних рішень при зміні персоналу;
- формування історії експлуатації та ремонтів;
- інформаційна база для планування технічного обслуговування і ремонтів;
- інструмент аналізу надійності та ресурсу.

Документація є інженерним інструментом, що забезпечує керованість експлуатаційних процесів.

Документування як елемент життєвого циклу обладнання

У межах життєвого циклу електрообладнання документація супроводжує такі етапи:

1. введення в експлуатацію;
2. робота в номінальних і перевантажувальних режимах;
3. технічне обслуговування;
4. поточні, середні та капітальні ремонти;
5. модернізація;
6. виведення з експлуатації.

Кожен етап потребує фіксації технічних рішень, параметрів і результатів робіт.

Склад експлуатаційної та ремонтної документації

У системі технічної експлуатації застосовується така документація:

1. Паспортна документація
- технічний паспорт обладнання;
- формуляр;
- заводські дані та характеристики.

2. Планова документація
- графіки планово-попереджувальних ремонтів (ППР);
- плани технічного обслуговування;
- ремонтні відомості.

3. Обліково-аналітична документація
- журнали оглядів і ремонтів;

- акти технічних випробувань;
- звіти за результатами ремонту.

Ці документи не є формальними — вони утворюють єдину систему технічного обліку.

Принципи ведення експлуатаційної документації

Ведення документації підпорядковується інженерній логіці, а не вимогам з охорони праці.

Основні принципи:

- об’єктивність — фіксація реальних параметрів і дефектів;
- технічна повнота — відображення суттєвих змін стану;
- системність — взаємозв’язок між паспортом, графіками та звітами;
- аналітична придатність — можливість використання даних для прогнозування;
- трасованість рішень — зрозуміло, хто, коли і чому виконав роботи.

Графіки планово-попереджувальних ремонтів (ППР)

1. Інженерна сутність ППР

Графік ППР — це інструмент управління технічним ресурсом обладнання, а не адміністративний документ.

ППР дозволяє:

- підтримувати працездатність;
- мінімізувати аварійні простої;
- планувати навантаження ремонтного персоналу;
- забезпечувати рівномірний знос елементів.

2. Структура графіка ППР

Типовий графік містить:

- найменування та ідентифікацію обладнання;
- види робіт;
- періодичність;
- планові терміни;
- відповідальних виконавців.

3. Коригування ППР

Коригування графіків здійснюється на підставі:

- результатів діагностики;
- аналізу відмов;
- зміни режимів роботи;
- модернізації обладнання.

Технічний паспорт обладнання

1. Роль технічного паспорта

Технічний паспорт є базовим носієм інформації про обладнання.

Він забезпечує:

- ідентифікацію;
- доступ до технічних параметрів;
- фіксацію історії ремонтів;
- зв’язок між проєктними та фактичними характеристиками.

2. Інформація, що вноситься до паспорта

У паспорті фіксуються:

- номінальні та фактичні параметри;
- зміни конструкції;
- результати випробувань;
- відомості про ремонти;
- зауваження щодо експлуатації.

Акти випробувань і технічні звіти

1. Акти випробувань

Акт випробувань — це технічний документ, який підтверджує:

- результати вимірювань;
- відповідність параметрів допустимим значенням;
- готовність обладнання до подальшої роботи.

Акт є основою для:

- введення після ремонту;
- продовження експлуатації;
- коригування ППР.

2. Технічні звіти

Технічний звіт узагальнює:

- результати дефектації;
- перелік виконаних робіт;
- замінені елементи;
- рекомендації щодо подальшої експлуатації.

Документація як інструмент інженерного аналізу

Сукупність експлуатаційних документів дозволяє:

- аналізувати повторюваність дефектів;
- оцінювати надійність вузлів;
- прогнозувати залишковий ресурс;
- переходити до обслуговування за технічним станом.

Таким чином, документація є основою інженерних рішень, а не формальним обліком.

Документування ремонтних і сервісних робіт є частиною інженерної культури експлуатації.

Воно забезпечує керованість технічного стану обладнання, ефективність ремонтів і обґрунтованість подальших технічних рішень.

Висновки.

1. Документування ремонтних і сервісних робіт є невід'ємною складовою системи технічної експлуатації електрообладнання та електроприводів і забезпечує керованість їх технічного стану протягом усього життєвого циклу.

2. Експлуатаційна документація розглядається як інженерний інструмент, що дозволяє фіксувати фактичні параметри роботи обладнання, результати оглядів, діагностики, ремонтів і випробувань, а не як формальний або адміністративний облік.

3. Системне ведення технічних паспортів, графіків планово-попереджувальних ремонтів, актів випробувань і технічних звітів створює інформаційну основу для аналізу надійності, ресурсу та працездатності обладнання.

4. Графіки планово-попереджувальних ремонтів є засобом управління технічним ресурсом обладнання та забезпечують перехід від реактивного усунення відмов до планового і прогнозованого технічного обслуговування.

5. Технічний паспорт обладнання виконує ключову роль у забезпеченні простежуваності змін технічного стану, конструктивних рішень і результатів ремонтів протягом експлуатації.

6. Акти випробувань і технічні звіти дозволяють об'єктивно оцінювати результати виконаних робіт та приймати обґрунтовані інженерні рішення щодо подальшої експлуатації, ремонту або модернізації обладнання.

7. Якість і повнота експлуатаційної документації безпосередньо впливають на ефективність ремонтних робіт, зниження кількості аварійних відмов та раціональне використання технічного ресурсу обладнання.

8. Систематизоване документування створює передумови для впровадження сучасних підходів до технічного обслуговування, зокрема обслуговування за технічним станом і використання автоматизованих систем управління ремонтами.

Контрольні питання.

1. Яке місце займає документація в системі управління технічним станом електрообладнання?

2. Які функції виконує документування в процесі експлуатації та ремонту?

3. Чому документація розглядається як інженерний інструмент, а не формальний облік?

4. Які етапи життєвого циклу електрообладнання потребують документального супроводу?

5. Яке значення має накопичення історії експлуатації та ремонтів?

6. Які основні групи експлуатаційної та ремонтної документації застосовуються?

7. Чим відрізняється паспортна, планова та обліково-аналітична документація?

8. Які принципи лежать в основі ведення експлуатаційної документації з інженерної точки зору?

9. Що означає трасованість технічних рішень і чому вона важлива?

10. Яке інженерне призначення графіків ППР?

11. Які дані є базовими для формування графіка ППР?

12. За якими результатами здійснюється коригування графіків ППР?

13. Яке призначення технічного паспорта в процесі експлуатації?

14. Яка інформація є критично важливою для внесення до технічного паспорта?

15. Яке призначення актів випробувань у системі технічної експлуатації?

16. Яку інформацію узагальнюють технічні звіти після ремонту?

17. Як експлуатаційна документація використовується для аналізу надійності обладнання?

18. Яким чином документація забезпечує перехід до обслуговування за технічним станом?

19. Узагальнюючі

20. Як якість ведення документації впливає на ефективність ремонтів?

21. Які наслідки має несистемне або фрагментарне документування?

Використана література.

1. Правили технічної експлуатації електроустановок споживачів : затв. Наказом Міністерства палива та енергетики України 25.07.2006 № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугольної промисловості України від 13.02.2012 №91) 3-те вид. Х.: Видавництво «Індустрія», 2018. 320 с.

2. Положення про технічне обслуговування устаткування підприємств гірничо-металургійного комплексу : затв. Міністерством промислової політики України від 15.06.2004 № 285. Х.: Видавництво «Індустрія», 2023. 48 с.

3. Положення про технічне обслуговування устаткування підприємств гірничодобувних підприємств : затв. Міністерством промислової політики України від 04.07.2003 № 281. Х.: Видавництво «Індустрія», 2020. 20 с.

ТЕМА 11. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ ТА НОРМАТИВНІ ВИМОГИ ПРИ ОБСЛУГОВУВАННІ Й РЕМОНТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ТА ОБЛАДНАННЯ

Основні нормативні документи (ДСТУ, ПУЕ, інструкції). Вимоги безпеки при експлуатації та ремонті електроприводів і електронних приладів. Дії персоналу у разі аварійних ситуацій.

Електробезпека є однією з ключових умов безпечної експлуатації промислового електрообладнання та систем електроприводу. Під час обслуговування і ремонту електромеханічних систем персонал стикається з підвищеним ризиком ураження електричним струмом, тому суворе дотримання нормативних вимог та технічних заходів безпеки є обов'язковим.

Нормативно-правова база забезпечення електробезпеки

До основних нормативних документів, що регламентують вимоги безпеки при експлуатації та ремонті електрообладнання, належать:

1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) — затверджені наказом Міненерговугілля №476 від 21.07.2017 р.

Регламентують вимоги до заземлення, занулення, вибору обладнання, режимів нейтралі, категорій приміщень за ступенем небезпеки.

2. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Визначають порядок допуску персоналу, проведення оперативних перемикань, оформлення нарядів-допусків, інструктажів, перевірку знань.

3. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про навчання з питань охорони праці. Регламентує обов'язковість інструктажів і перевірок знань для електротехнічного персоналу.

4. ДСТУ EN 50110-1:2014 – "Експлуатація електроустановок. Загальні вимоги". Містить європейські стандарти з організації безпечних робіт під напругою, без напруги та поблизу неї.

5. ДСТУ ISO 45001:2019 – Системи управління охороною праці. Визначає вимоги до менеджменту ризиків і планування безпечного виробничого середовища.

6. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС).

Основи електробезпеки

Дія електричного струму на організм людини.

Широке застосування електричної енергії в промисловості супроводжується потенційною небезпекою поразки електричним струмом внутрішніх (по-разка органів подиху, порушення роботи серця) чи зовнішніх (опіки) органів обслуговуючого персоналу. Положення погіршується ще тим, що відсутні які-небудь зовнішні ознаки, що застерігають людину про загрозливу йому небезпеку.

Наслідки дії електричного струму на організм людини залежать, в основному, від величини струму, що проходить через тіло людини, і тривалості його дії. В залежності від цього розрізняють:

– відчутний струм найменше значення струму, вплив якого відчуває людина. Величина його коливається від 0,5 до 2 мА при змінному струмі часто-тою 50 Гц і 5-7 мА при постійному струмі;

– струм, що відпускає найбільше (граничне) значення струму, при якому людина зберігає здатність самостійно звільнитися від контакту з частинами, що знаходяться під напругою;

– струм, що невідпускає найменше значення струму, при якому людина втрачає здатність керувати м'язами, не може звільнитися самостійно від контакту і, отже, піддається смертельній небезпеці.

Для визначення величини короткочасного безпечного струму $I_{к.б.}$ користаються формулою Дальзіеля:

$$I_{к.б.} = \frac{116}{\sqrt{t}}, \text{мА},$$

де t тривалість впливу струму на людину, с.

Приведена формула рекомендована для визначення струмів понад 40-50 мА і час впливу від 0,03 до 3 с.

Комісія Центрального правління науково-технічного товариства енергетичної промисловості по встановленню критеріїв безпеки електричного струму, на підставі узагальнення вітчизняних і закордонних досліджень, рекомендує значення припустимих для людини струмів і напруги дотику в залежності від тривалості їхнього впливу (табл. 11.1).

Реакція організму при поразках електричним струмом і можливими наслідками поразки залежать від багатьох факторів: параметрів електричного кола (напруги, опору), оточуючих умов (температури, вологості, тиску), шляху проходження струму через тіло людини, психологічного стану людини та ін.

Найбільш небезпечний струм, що проходить через серце, органи подиху і мозок. Постійний струм менш небезпечний у порівнянні з змінним. Електричний струм промислової частоти (50-60 Гц) є найбільш небезпечним для людини. Збільшення частоти струму до 2000-2500 Гц мало впливає на зменшення його небезпечного впливу, однак подальше збільшення частоти струму помітно зменшує ступінь небезпеки електричного струму, що використовується в меди-цині. Вага поразки організму залежить від хімічного складу крові, психологічного стану людини та ін. У стані сп'яніння людини чи при несподіваній його поразці дія струму стає більш небезпечною.

Основними факторами, що визначають величину струму, що проходить через тіло людини, є опір тіла людини і величина прикладеної до тіла напруги (напруга дотику).

Таблиця 11.1 -Гранично припустимі рівні напруги і струмів дотику через тіло людини

Рід струму	Нормована величина	Тривалість впливу струму t, с											
		0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	>1.0
Змінний, частотою 50 Гц	U, В I, мА	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
Випрямлений однопівперіодний	$U_{амп}$, В $I_{амп}$, мА	650	500	400	300	250	200	190	180	170	160	150	–
Випрямлений двопівперіодний	$U_{амп}$, В $I_{амп}$, мА	650	500	400	300	270	230	220	210	200	190	180	–
Постійний	U, В I, мА	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40

Опір тіла людини залежить від розмірів поверхні дотику і його характеру (щільне охоплення чи випадкове торкання), стану шкіри (товщина рогового шару, її вологість, забруднення), величини прикладеної напруги і величини протікаючого струму. Для умов гірничих підприємств нижню границю опору тіла людини варто приймати на рівні 1000 Ом. Як гранично безпечну величину тривалого струму в нашій країні для вугільних шахт «Правила виготовлення вибухозахищеного ти рудничного електроустаткування» (ПВВРЕ) встановлюють 30 мА, а при автоматичній компенсації ємнісної складової струму витоку - 25 мА.

Знаючи безпечну величину тривалого струму ($I_{т.б}$) і мінімальну величину опору тіла людини $R_{люд}$, можна визначити припустиму безпечну величину на-пруги дотику:

$$U_{\text{дот.прип}} = I_{\text{д.}} R_{\text{люд}} = 0{,}003 \cdot 1000 = 30\text{В}.$$

Діючими правилами і нормами на терені України не розмежовується небезпека між постійним і змінним струмом. Однак вважають, що для постійного струму величина тривалого припустимого струму складає 60-80 мА.

Вплив режиму нейтралі електричних мереж на рівень електробезпечності

Надійність роботи електроустановок і систем електропостачання багато в чому залежить від режиму нейтрали мережі. Відповідно до Правил пристрою електроустановок (ППЕ) за режимом роботи нейтралі всі електроустановки поділяються на дві групи:

– із глухозаземленою нейтраллю;
– із ізольованою нейтраллю.

Електричні мережі напругою до 1000 В працюють як з ізольованою, так і з заземленою нейтраллю. При виборі режиму роботи нейтралі враховують вимоги економіки, надійності й електробезпечності.

У відношенні електробезпечності найбільш небезпечним є випадок одночасного дотику людини до відкритих струмоведучих частин двох фаз (рис.11.1).

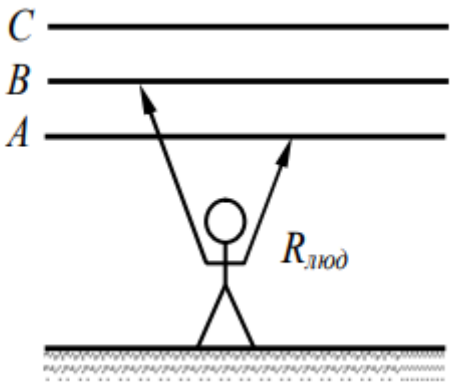


Рисунок 11.1 - Дотик людини до двох фаз електричної мережі

Величина струму, що проходить через тіло людини, $I_{люд}$ у цьому випадку визначається напругою мережі й опором тіла людини і не залежить від режиму роботи нейтралі мережі:

$$I_{\text{люд}} = \frac{U_{\text{л}}}{R_{\text{люд}}} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ф}}}{R_{\text{люд}}},$$

де $U_{\text{л}}, U_{\text{ф}}$ - відповідно лінійна і фазна напруги мережі.

Однак випадок одночасного дотику до двох різних фаз мережі порівняно рідкий. Найбільш розповсюджений випадок дотику до однієї фази мережі або до отримавшого електричне з'єднання з фазою корпусу електроустаткування. Величина струму, що проходить через тіло людини, яка доторкнулася до однієї фази, а отже, і небезпека поразки струмом будуть залежати за інших рівних умов від того, заземлена чи ізольована нейтраль електричної мережі.

Мережею з глухозаземленою нейтраллю називається мережа, у якій нейтралі (нульові точки) генераторів і трансформаторів приєднані до пристрою, що заземлює, безпосередньо чи через малий опір. У мережі з заземленою нейтраллю, при нормальному опорі ізоляції, напруга кожної фази щодо землі практично дорівнює фазній напрузі. Доторкнувшись до будь-якої фази людина виявляється під фазною напругою (рис. 11.2).

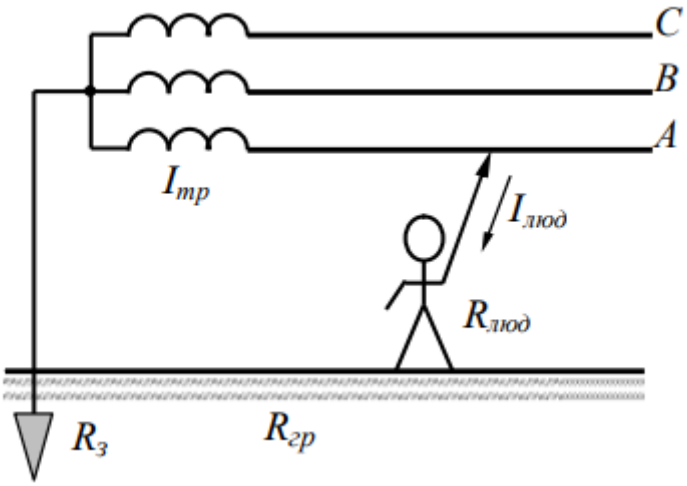


Рисунок 11.2 - Дотик людини до фази у мережі з заземленою нейтраллю

Величина струму, що проходить через тіло людини, у цьому випадку, якщо зневажити малими величинами опору ґрунту $r_{\text{гр}}$ і робочого заземлення з у порівнянні з опором людини $R_{\text{люд}}$, буде:

$$I_{\text{люд}} = \frac{U_{\text{л}}}{R_{\text{люд}} + r_{\text{гр}} + r_{\text{з}}} \approx \frac{U_{\text{ф}}}{R_{\text{люд}}}.$$

Як бачимо струм $I_{\text{люд}}$ визначається напругою мережі й опором тіла людини. Цей струм небезпечний вже при лінійній напрузі мережі 127 В.

Мережею з ізольованою нейтраллю називається мережа, у якій нейтралі генераторів і трансформаторів ізольовані від землі чи з'єднані з нею через велике (у порівнянні з ізоляцією мережі щодо землі) опір.

Небезпека поразки електричним струмом у випадку дотику до струмоведучих частин у системі з ізольованої нейтраллю значною мірою залежить від величини ємності мережі щодо землі. Відповідно до цього електричні мережі можна розділити на дві основні групи: з малою ємністю мережі щодо землі і з великою ємністю.

Розглянемо електричну мережу з ізольованої нейтраллю з малою (близькою до нуля) ємністю мережі щодо землі (рис. 11.3) при рівності опору ізоляції фаз щодо землі $r_1 = r_2 = r_3$. При дотику людини, що має опір $R_{\text{люд}}$, до фази 1 опір ізоляції цієї фази зменшиться до величини

$$r`_1 = \frac{r_1 \cdot R_{\text{люд}}}{r_1 + R_{\text{люд}}},$$

і симетрія системи порушиться.

Рівняння для визначення струму, що проходить через тіло людини

$$I_{\text{люд}} = \frac{3U_{\text{ф}}}{3R_{\text{люд}} + r}.$$

Рівняння показує, що безпека в мережах з ізольованою нейтраллю і малою ємністю багато в чому залежить від опору ізоляції мережі. Високий опір ізоляції мережі забезпечує безпечне значення струму, що проходить через тіло людини у випадку дотику його до однієї з фаз. Прийнявши $I_{\text{люд}} = I_{\text{т.б}}$, мінімальне безпечне значення ізоляції мережі

$$r = \frac{3U_{\text{ф}}}{I_{\text{т.б}}} - 3R_{\text{люд}}.$$

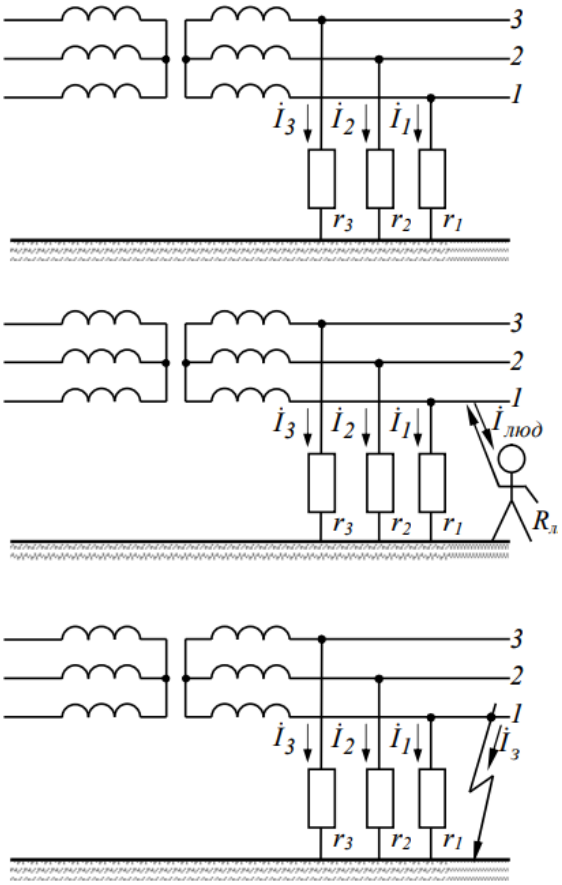


Рисунок 11.3 - Схеми електричної мережі з ізольованої нейтраллю без врахування ємності мережі

Найбільш небезпечним буває дотик людини до однієї з фаз, коли яка небудь з інших фаз замкнута на землю (наприклад, r_2=0). У цьому випадку струм, що проходить через тіло людини, визначається величиною лінійної напруги.

$$I_{\text{люд}} = \frac{U_{\text{л}}}{R_{\text{люд}}} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ф}}}{R_{\text{люд}}}.$$

Дотик до однієї з фаз у мережі з ізольованою нейтраллю виявляється небезпечним лише у випадку, коли опір ізоляції іншої фази дорівнює нулю чи коли опір ізоляції мережі недостатньо великий. Якщо враховувати наявність ємності мережі щодо землі, то ємнісні опори x_c виявляться приєднаними паралельно активному опору ізоляції мережі (рис. 11.4), а струм, що проходить через тіло людини, визначиться з рівняння

$$I_{\text{люд}} = 3U_{\text{ф}}\, Y\, \frac{Y_{\text{люд}}}{3Y + Y_{\text{люд}}},$$

де $Y = \frac{1}{r} + j\omega C$– провідність ізоляції однієї фази мережі щодо землі; люд люд $Y_{\text{люд}} = \frac{1}{R_{\text{люд}}}$ – провідність тіла людини; С – ємність однієї фази мережі щодо землі; ω – кутова частота струму в мережі.

В таких мережах величина x_c може виявитися в багато разів менше r, струмами витоку через активний опір ізоляції можна зневажити. Тоді, рахуючи, що $C_1 = C_2 = C_3 = C$,

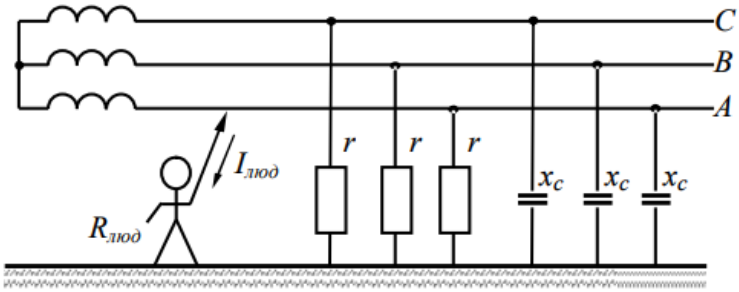


Рисунок 11.4 - Дотик людини до фази зі значною ємністю мережі щодо землі

$$I_{\text{люд}} = \frac{3U_{\text{ф}}\, \backslash omega\, C}{\sqrt{9R_{\text{люд}}^2\omega^2C^2 + 1}}.$$

При глухому замиканні однієї фази на землю струм, що проходить через місце замикання, $I_з$ визначиться з рівняння:

$$I_з = 3U_{\text{ф}}\omega\text{C}.$$

Приблизно ємнісні струми замикання на землю визначаються виходячи із середніх значень ємності:

- для повітряних ліній

$$I'_{з} = \frac{U_{л} L_{пов}}{350} = \frac{\sqrt{3}\, U_{ф} L_{пов}}{350};$$

- для кабельних ліній 6–10 кВ

$$I''_{з} = \frac{U_{л} L_{к}}{10} = \frac{\sqrt{3}\, U_{ф} L_{к}}{10};$$

- для змішаних повітряних і кабельних ліній

$$I_{з} = I'_{з} + I''_{з} = \frac{\sqrt{3} U_{ф} (L_{пов} + L_{к})}{350},$$

де $L_{пов}$ і $L_{к}$ – відповідно довжина повітряних і кабельних ліній, електрично зв'язаних між собою, км.

Для забезпечення безпеки експлуатації мережі з ізольованою нейтраллю першорядне значення мають високий опір ізоляції і мінімальна ємність мережі. Величина опору ізоляції визначається в основному властивостями ізоляційних матеріалів і умовами її експлуатації. Так, наприклад, величина опору ізоляційних матеріалів знижується при їхньому зволоженні. Для підтримки високого опору ізоляції використовують якісні ізоляційні матеріали, проводять підсушування ізоляції, а також, по можливості, створюють мікроклімат. На відміну від методів підвищення опору ізоляції, що значною мірою залежать від прийнятих конструктивних і експлуатаційних мір, зниження ємності мережі практично не можна досягти цими мірами, якщо не враховувати можливість дроблення мережі.

Зменшити вплив ємності мережі на безпеку експлуатації можна шляхом компенсації ємнісної складової струму витоку, для чого між нейтраллю мережі і землею необхідно включити індуктивний опір. У цьому випадку через місце ушкодження, крім активної і ємнісної складової, протікає індуктивна складова, котра по фазі відрізняється від ємнісної на 180°.

Сумарний струм у місці ушкодження відповідно зменшується. Відзначимо, що за допомогою описаних методів можна лише знизити величину електричного струму, що проходить через тіло людини, і тим самим зменшити, але не попередити цілком небезпеку поразки їм.

Міри захисту від поразки електричним струмом

В даний час широко застосовуються загальні міри "попередження" поразки струмом, з яких основними є:

1. Роз'яснювальна робота про небезпеку електричного струму і мірах боротьби з ними.

2. Забезпечення неприступності дотику до струмоведучих частин. Цей захід здійснюється шляхом монтажу відкритих струмоведучих час-

тин електроустановки (наприклад, голі контактні проводи електровозного відкочування та ін.) на недоступній для випадкового дотику висоті.

3. Захист від випадкового дотику до струмоведучих частин. Цей захист забезпечується:

- закритим виконанням рудничного устаткування, тобто застосуванням оболонок (корпусів) для електричних машин і апаратів, кабельних введень і т.п., що закривають неізольовані струмоведучі частини;

- застосуванням блокувальних пристроїв, що перешкоджають доступу до струмоведучих частин до зняття з останніх напруги.

4. Застосування зниженої напруги для електроустановок найбільш небезпечних у відношенні поразки електричним струмом. До таких установок у шахтах відносяться переносні електричні машини й апарати (ручні електросвердла, переносні електроосвітлювальні установки, сигнальні установки й ін.), для яких діючі ПБ наказують застосування напруги не понад 127 В.

По цих же причинах для живлення кіл захисту і дистанційного керування, електрично зв'язаних з корпусом електроустаткування, допускається застосування напруги не понад 36 В.

5. Ізоляція неструмоведучих частин. Цей захід здійснюється головним чином для ручних електросвердел. Рукоятки і тильну частину електроустаткування, з якими безпосередньо стикається бурильник під час роботи, покривають надійним і міцним шаром ізоляції.

6. Загальні міри безпеки. До них відноситься застосування ізолюючих підставок і килимків, гумових ботів і рукавичок, сигналізації й ін.

Але ці загальні міри недостатні для забезпечення безпечного застосування електричної енергії в підземних виробленнях шахт. Тому в підземних виробленнях застосовуються також спеціальні міри забезпечення безпеки.

В умовах експлуатації електроустановок поразка електричним струмом може відбутися при дотику людини:

1) до відкритих струмоведучих частин електроустановок, що знаходиться під напругою;

2) до металевих корпусів чи частин електроустаткування, що нормально не знаходяться під напругою, але які здобувають небезпечний потенціал у випадку замикання струму на корпус.

Як основний засіб захисту від небезпеки поразки струмом при дотику до корпусу, який виявився під напругою щодо землі, одержало саме широке поширення захисне заземлення електроустаткування, тобто з'єднання з землею його частин, що нормально не знаходяться під напругою.

Захист від небезпеки поразки при дотику до струмоведучих частин електроустановок, що знаходяться під напругою, здійснюється за допомогою захисного відключення за допомогою реле витоку.

Це реле витоку здійснює також резервний захист від небезпечних наслідків дотику до корпусу електроустаткування, який виявився під напругою щодо землі.

Призначення захисного заземлення

У мережі з ізольованою нейтраллю при ушкодженні ізоляції одного з провідників, що знаходяться усередині провідного корпусу електроустановки, останній виявляється під напругою щодо землі (рис. 11.5). Якщо до такого корпусу доторкнеться людина, що стоїть на провідному ґрунті, а корпус виявиться ізольованим від землі, то виникаючий під дією цієї напруги струм цілком пройде через людину. Величина цього струму при опорі кожної фази мережі щодо землі $z_1 = z_2 = z_3 = z$ і при опорі людини $R_{люд}$, визначиться вираженням

$$I_{люд} = \frac{3U_ф}{3R_{люд} + z}.$$

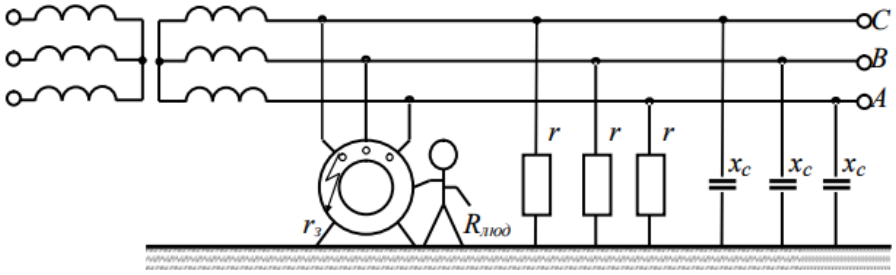


Рисунок 11.5 - Дотик людини до корпусу електроустаткування з ушкодженою ізоляцією

Якщо і корпус і людина знаходяться на провідному ґрунті (рис. 11.5), по струм замикання на землю (струм витоку) розгалужується по двох шляхах. Частина цього струму проходить через людину, що доторкнулася до корпусу, а частина йде через корпус у землю.

При паралельному з'єднанні опору людини $R_{люд}$ і опору корпуса щодо землі $r_з$ струми, що протікають через них виявляться зворотньопропорційними цим опорам:

$$I_з = I\frac{R_{люд}}{R_{люд} + r_з}; \qquad I_{люд} = I\frac{r_з}{R_{люд} + r_з}.$$

Якщо співвідношення величин $R_{люд}$ і $r_з$ буде таким, що частина повного струму витоку, яка протікає через людину виявиться менше граничної безпечної величини $I_{д.б}$, той дотик до корпуса буде безпечним. Тому для попередження небезпеки варто максимально можливо знизити величину перехідного опору корпусу щодо землі $r_з$. У зв'язку з цим ПБ передбачають необхідність створення спеціальних, постійно існуючих надійних з'єднань корпусів електроустаткування з землею – захисних зазе-

млень, що знижують значення $r_з$. Якщо, наприклад, $r_з$ = 4 Ом, то через людину пройде тільки 1/250 частина струму замикання.

Заземленню підлягають усі металеві частини електроустановок, що нормально не знаходяться під напругою, але можуть виявитися під напругою через ушкодження ізоляції.

Захисне заземлення – важлива міра захисту від небезпечних напруг дотику на корпусах електроустаткування, що повинна забезпечувати умову

$$U_{\text{дот}} = I_з r_з \leq U_{прип},$$

де $I_з$ – струм однофазного замикання на корпус; $U_{прип}$ – припустима за умовами електробезпечності напруга; $r_з$ – опір заземлення.

До захисного заземлення пред'являються наступні основні вимоги:

- максимальний опір заземлення, який вимірюється у кожній (у тому числі і найбільш віддаленій від головних заземлювачів) точці заземлюючої мережі, не повинен перевищувати 4 Ом (2 Ом для підземних гірничих робіт);

- загальна мережа захисного заземлення повинна створюватися шляхом безупинного (як правило, паралельного) з'єднання всіх заземлених елементів між собою.

Сутність захисного відключення

Захисне відключення служить основною захисною мірою від небезпеки дотику людини до струмоведучих частин електроустановки, що знаходяться під напругою. Це – швидкодіючий захист, що забезпечує автоматичне відключення електроустановки при досягненні струмом через тіло людини гранично безпечного значення.

Існує велика кількість схем і конструкцій пристроїв захисного відключення, заснованих на різних принципах. У мережах з ізольованою нейтраллю пристрої захисного відключення (ПЗВ) здійснюються за принципом накладення оперативного струму на контрольовану мережу, а також з використанням вентильних схем. Такі пристрої крім захисного відключення виконують ще одну дуже важливу функцію – вимір і контроль активного опору ізоляції мережі щодо землі. У цьому випадку захисні і профілактичні функції сполучаються.

Принцип роботи захисного відключення в мережі з ізольованою нейтраллю розглянемо на схемі (рис. 11.6), де ПЗВ показано в загальному виді, незалежно від його внутрішньої схеми. При досягненні струму уставки ПЗВ спрацьовує, і за допомогою відключаючої котушки QF1 автоматичного вимикача знімає напругу з мережі.

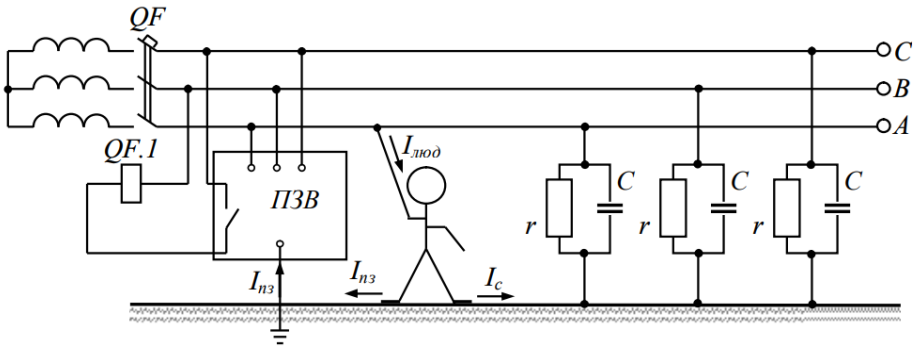


Рисунок 11.6 - Принципова схема захисного відключення і контролю ізоляції в мережі з ізольованою нейтраллю

Велике значення з позицій безпеки і надійності мережі має час спрацьовування ПЗВ. Необхідно мати захист із найменшим часом відключення. Час відключення складається з часу дії захисту і часу дії автоматичного вимикача з приводом. Для ПЗВ час відключення приймається 0,1–0,2 с. Це значить, що відключення аварійної ділянки чи мережі в цілому повинно здійснюватися за час не більш 0,1– 0,2 с.

Захисне відключення можна застосовувати як єдину міру захисту, так і основною, разом з додатковим заземленням чи зануленням. Більш високі вимоги повинні пред'являтися до тих пристроїв захисного відключення, що використовуються як єдина міра захисту. В таких пристроях необхідний самоконтроль для запобігання роботи електроустановки при несправному захисному відключенні. Однак здійснення самоконтролю не повинно знижувати вимоги до надійності захисного відключення, щоб уникнути перебоїв в електропостачанні.

Основний недолік розглянутого принципу ПЗВ – неселективне відключення електроустановки як при однополюсному дотику людини, так і при зниженні загального активного опору ізоляції мережі щодо землі.

Занулення.

Зануленням називається навмисне з'єднання неструмоведучих частин електроустановки, що випадково можуть виявитися під напругою, із глухо заземленої нейтраллю джерела живлення за допомогою нульового проводу.

Занулення застосовується в мережах напругою до 1000 В з заземленою нейтраллю. Корпуси електроустаткування при зануленні з'єднують не з заземлювачами, а з нульовим проводом (рис. 11.7).

При ушкодженні ізоляції (пробій на корпус) виникає струм короткого замикання (к.з.), здатний забезпечити спрацьовування захисту і, отже, автоматичне відключення ушкодженої установки від мережі. В якості апаратів захисту застосовують плавкі запобіжники, автоматичні вимикачі, магнітні пускачі й ін.

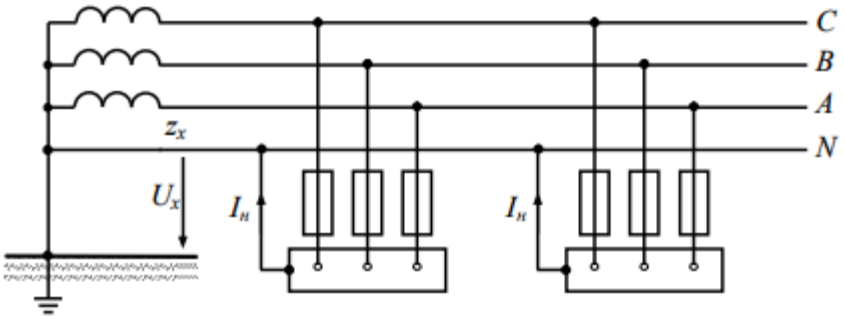


Рисунок 11.7 - Принципова схема занулення електрообладнання в мережі з заземленою нейтраллю .

Основна вимога Правил пристрою електроустановок (ППЕ) до пристрою занулення – забезпечити значення струму, що надійно відключає аварійну ділянку мережі. Для цього необхідно, щоб струм к.з.

$$I_к \Rightarrow kI_{ном},$$

де $I_{ном}$ – номінальний струм плавкої вставки чи струм уставки розчеплювача автоматичного вимикача; k – коефіцієнт, прийнятий у залежності від виду захисного пристрою (при захисті плавкими вставками чи автоматичними вимикачами, що мають розчеплювачі з зворотньо залежною від струму характеристикою, k = 3).

При замиканні на занулений корпус струм проходить через опори: фази трансформатора z_T, фазного проводу $z_ф$ і нульового проводу $z_н$.

Під час проходження струму к.з. на корпусах зануленного устаткування можуть виникати значні потенціали щодо землі. Тому швидке відключення ушкодженого устаткування – основна вимога до системи занулення у відношенні безпеки експлуатації.

Основні недоліки захисного занулення:

1) занулення сприяє виносу потенціалу по нульовому провіднику на неушкоджене устаткування, що приводить до розширення небезпечної зони;

2) відносно великий час спрацьовування апаратів захисту приводить до підвищеної небезпеки на цей час;

3) відмовлення в роботі при обриві нульового проводу;

4) при віддалених від джерела точках замикання струм к.з. може виявитися недостатнім для спрацьовування захисту, внаслідок чого створюється підвищена небезпека експлуатації.

Організаційні заходи безпеки

1. Розподіл персоналу за кваліфікаційними групами з електробезпеки (I–V):

- Група I – загальні відомості для неелектротехнічного персоналу;
- Група II–III – обслуговування електрообладнання;

- Група IV–V – керівництво та організація робіт.

2. Допуск до робіт:
   - Роботи виконуються за нарядом-допуском, розпорядженням або в порядку поточної експлуатації;
   - Обов’язкове зняття напруги, встановлення заземлень, перевірка відсутності напруги;
   - Встановлення плакатів “Не вмикати — працюють люди”.
3. Інструктажі та перевірки знань:
   - Первинний, повторний, позаплановий, цільовий;
   - Перевірка знань не рідше 1 разу на рік.

Технічні заходи безпеки при обслуговуванні електроприводів

1. Вимкнення та фіксація вимикаючих апаратів у положенні “Вимкнено”.
2. Перевірка відсутності напруги за допомогою справного покажчика напруги.
3. Встановлення переносних заземлень на всіх відключених частинах.
4. Огородження робочого місця сигнальними стрічками, плакатами, попереджувальними знаками.
5. Застосування діелектричних засобів захисту: рукавиць, калош, килимків, ізолюючих штанг, кліщів.

Специфіка безпеки при роботі з електроприводами

1. Електроприводи змінного струму (AC):
   - перед обслуговуванням — розрядка ємностей у фільтрах перетворювачів частоти;
   - заборонено доторкатись до силових шин і клем, поки не зник заряд (після 10 хвилин).
2. Електроприводи постійного струму (DC):
   - небезпека індукованих ЕРС при відключенні;
   - обов’язкова установка демпферних кіл і резисторів розряду.
3. Частотні перетворювачі, тиристорні регулятори, контролери:
   - роботи дозволяються лише після зняття напруги і підтвердження розряду конденсаторів;
   - необхідно дотримуватись вимог інструкцій виробника (Altivar, Siemens, ABB) щодо допуску до клем живлення.
4. Дії при обслуговуванні:
   - перевірка наявності заземлення корпусів;
   - недопустимість роботи при пошкодженій ізоляції кабелів, пробоях, запаху горіння;
   - перевірка цілісності сигнальних ланцюгів “Стоп”, “Аварійне вимкнення”.

Електробезпека під час ремонту

1. Ремонт електродвигунів:
   - обов’язкове зняття з мережі, вивішування плакатів;
   - перевірка опору ізоляції мегомметром (не менше 0,5 МОм);
   - контроль цілісності заземлення корпусу.
2. Ремонт електронних модулів керування:
   - дотримання антистатичних заходів;
   - виключення подачі живлення на стенд без встановлених захисних кожухів;
   - використання ізолюючих інструментів.
3. Заборона проведення робіт під напругою, окрім спеціально підготовленого персоналу з допуском V групи.

Дії персоналу у разі аварійних ситуацій

1. При ураженні електричним струмом:
   - негайно відключити джерело живлення або відтягнути потерпілого ізолюючим предметом;
   - викликати швидку допомогу (103), повідомити керівництво;
   - при відсутності дихання — негайно розпочати штучне дихання і непрямий масаж серця.
2. При пожежі в електроустановці:
   - знеструмити установку;
   - гасити тільки вуглекислотними або порошковими вогнегасниками;
   - заборонено використовувати воду та піну.
3. При короткому замиканні або пробої на корпус:
   - негайно зняти напругу, перевірити спрацювання захисту;
   - провести огляд і замір опору ізоляції до включення.

Документальне забезпечення електробезпеки

- Журнали обліку інструктажів з охорони праці;
- Журнали обліку перевірок знань з електробезпеки;
- Журнали вимірювання опору ізоляції та заземлення;
- Наряди-допуски на проведення робіт в електроустановках;
- Акти випробувань електрообладнання після ремонту.

Висновки.

1. Безпечна експлуатація електроприводів ґрунтується на дотриманні вимог ПУЕ, ПТЕЕС, НПАОП та відповідних ДСТУ.
2. Ефективна система електробезпеки включає технічні, організаційні та профілактичні заходи: ізоляцію, заземлення, занулення, застосування ПЗВ, обмеження напруги та використання засобів індивідуального захисту.
3. Кваліфікаційна підготовка персоналу та систематичні інструктажі є запорукою зниження травматизму.

4. Дотримання вимог до стану ізоляції, правильності підключення заземлення, справності захистів та своєчасне документування перевірок гарантують безпечне обслуговування електроустановок.

5. У разі аварії або ураження струмом необхідно діяти швидко та чітко відповідно до затверджених інструкцій і правил охорони праці.

Контрольні питання.

1. Які нормативні документи регламентують вимоги електробезпеки під час експлуатації електроприводів?
2. Що визначає класифікація електроустановок за режимом нейтралі?
3. Які основні засоби технічного захисту персоналу від ураження електричним струмом?
4. У чому полягає призначення захисного заземлення?
5. Які вимоги до опору захисного заземлення в промислових установках?
6. Що таке пристрій захисного відключення (ПЗВ) і який допустимий час його спрацьовування?
7. У чому полягає різниця між зануленням і заземленням?
8. Які заходи безпеки необхідно виконати перед початком робіт з електроприводом?
9. Які дії повинен здійснити персонал у разі ураження людини електричним струмом?
10. Які документи ведуться для контролю стану електробезпеки на підприємстві?

Використана література.

1. Електричні мережі та системи : конспект лекцій / уклад.: С. П. Шевчук, О. В. Мейта. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 167 с.
2. Василега П. О. Електропостачання : підручник. Суми : Сумський державний університет, 2019. 521 с.
3. Мілих В. І., Павленко Т. П. Електропостачання промислових підприємств : підручник для студентів електромеханічних спеціальностей. Київ : Каравела, 2018. 272 с.
4. Давиденко Л. В. Електропостачання промислових об’єктів. Практикум : навчальний посібник. Луцьк : ВІП ЛНТУ, 2022. 244 с.
5. Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476 Про затвердження Правил улаштування електроустановок.

Навчально-методичне видання

Шрамко Юрій Юрійович

Ремонт і обслуговування електроприводу та електронних приладів промислового обладнання: курс лекцій з дисципліни

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторський редакції